

В. Б. Крицький¹, О-й П. Шугайло¹,
П. Т. Матченко¹, Н. І. Крицька¹, Т. І. Матченко²

¹ Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

² ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», м. Київ, Україна

Аналіз методологічної бази з розрахункового обґрунтування міцності сталевих будівельних конструкцій енергоблоків АЕС, які експлуатуються

Протягом останнього десятиріччя в Україні набули чинності нові національні нормативні документи (НД) з питань проектування та оцінки технічного стану будівельних, зокрема сталевих, конструкцій на заміну відповідних НД-аналогів колишнього СРСР. Зроблено аналіз НД України на предмет коректності викладених методологій виконання розрахункових обґрунтувань міцності сталевих конструкцій. Встановлено, що чинні НД України не містять викладення методик і процедур (формул) стосовно виконання розрахунків сталевих конструкцій на опір крихкому руйнуванню і на циклічну тріщиностійкість, а окремим положенням цих НД притаманні певні некоректності. Проаналізовано низку публікацій щодо методів розрахунку сталевих конструкцій на витривалість, утому, циклічну тріщиностійкість, опір крихкому руйнуванню.

Ключові слова: сталеві конструкції, методика, аналіз міцності, ресурс.

В. Б. Крицький, А-й П. Шугайло, П. Т. Матченко, Н. І. Крицька,
Т. І. Матченко

Анализ методологической базы по расчетному обоснованию прочности эксплуатируемых стальных строительных конструкций эксплуатируемых энергоблоков АЭС

В течение последнего десятилетия в Украине введены в действие новые национальные нормативные документы (НД) в сфере проектирования и оценки технического состояния строительных, в частности стальных, конструкций на замену соответствующих НД-аналогов бывшего СССР. Сделан анализ НД Украины на предмет корректности изложенных методологий выполнения расчетных обоснований прочности стальных конструкций. Установлено, что действующие НД Украины не содержат изложение методик и процедур (формул) в части выполнения расчетов стальных конструкций на сопротивление хрупкому разрушению и циклическую трещиностойкость, а некоторым положениям этих НД присущи определенные некорректности. Проанализирован ряд публикаций касательно предлагаемых методов расчета стальных конструкций на выносливость, усталость, циклическую трещиностойкость, сопротивление хрупкому разрушению.

Ключевые слова: стальные конструкции, методика, анализ прочности, ресурс.

© В. Б. Крицький, О-й П. Шугайло, П. Т. Матченко, Н. І. Крицька,
Т. І. Матченко, 2017

Наразі в Україні реалізується значний обсяг заходів з обґрунтування та забезпечення продовження ресурсу (строку служби) енергоблоків АЕС у понадпроектний термін. Ці заходи охоплюють практично весь склад важливих для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ) систем і компонентів енергоблока: обладнання, трубопроводи, будівельні (зокрема, сталеві) конструкції споруд АЕС тощо. В Україні обґрунтування працездатності (міцності, прийнятної деформованості, несучої спроможності) важливих для забезпечення ЯРБ сталевих будівельних конструкцій здійснюється відповідно до положень нормативних документів (НД) [1–3], а для сталевих конструкцій, не класифікованих як відповідальні за ЯРБ, — відповідно до вимог [4–6]. До заходів з обґрунтування можливості продовження ресурсу згідно з [6] входять перевіріть розрахунки працездатності конструкцій з метою визначення відповідності їх стану вимогам [1–8]. При цьому навантаження та впливи на сталеві конструкції визначаються за вимогами [2, 7–10].

Спеціалізовані галузеві НД з питань проектування сталевих конструкцій АЕС в Україні відсутні. Основний НД щодо проектування будівельних конструкцій АЕС — ПнН АЭ-5.6 [2] — з конкретних питань розрахункового аналізу конструкцій посилається на профільні загальнобудівельні НД — СНиП, які в Україні здебільшого втратили чинність і в останні 10–15 років замінені на національні НД — державні будівельні норми (ДБН, ДСТУ тощо, див. [4–11]) відповідної спрямованості.

З урахуванням актуалізації нормативної бази, обґрунтування міцності наявних споруд і конструкцій, які згідно з ПнН АЭ-5.6 [2] належать до I, II, III категорій відповідальності за ЯРБ, треба виконувати згідно з вимогами [2, 5, 7], а для споруд і конструкцій, стан яких не впливає на ЯРБ, — згідно з вимогами [4, 5, 8]. Склад і параметри характерних кліматичних, а також технологічних навантажень і впливів на сталеві конструкції мають визначатися за ДБН В.1.2-2:2006 [10].

Зазначимо, що в [2, 4, 5, 10] є певні невизначеності щодо методології та (або) процедури виконання окремих перевірих розрахунків працездатності сталевих конструкцій:

1. У ДБН В.1.2-14-2009 [4] наведено номенклатуру характеристик технічного стану і працездатності конструкцій: безвідмовність, живучість, довговічність, безпека, але в жодному НД України не викладено методологію і математичний апарат, за якими треба розраховувати їх числові параметри.

2. У ПнН АЭ-5.6 [2] зазначено, що конструкції, віднесені до I категорії відповідальності за ЯРБ, мають бути розраховані на стійкість до впливу особливих навантажень з інтенсивністю, яка відповідає частоті повторюваності один раз на 10000 років. Такими особливими навантаженнями згідно з [2] є екстремальні вітер, сніг, температура, урагани, смерчі, цунамі, максимальний розрахунковий землетрус, максимальна проектна аварія, падіння літака тощо. Проте в чинних НД України не викладено методологію визначення таких навантажень (за винятком землетрусу, а також призначення розрахункових параметрів смерчу для майданчика Чорнобильської АЕС в документі «Основні нормативні вимоги та розрахункові характеристики смерчів для майданчика Чорнобильської АЕС», що затверджений наказом Держбуду України від 21.10.02 № 64 та опублікований в «Інформаційному бюлетені Держбуду» № 10, жовтень 2002 р.). У ДБН В.1.2-2:2006 [10] надано вказівки щодо визначення інтенсивності вітрового, снігового й кліматичного температурного навантаження для мінімальної частоти повторюваності означеної

події один раз на 500 років. Як наслідок, у розрахункових обґрунтуваннях для врахування екстремальних вітрового й снігового навантажень застосовуються наведені в ПиН АЭ-5.6 [2] консервативні коефіцієнти надійності за навантаженням $\gamma_f = 2,5$ і $\gamma_f = 2,0$, відповідно. Процедури (методології) визначення інтенсивності впливів на споруди (конструкції) ураганів, смерчів, цунамі в чинних НД України не викладені. Деякі з можливих варіантів математичного апарату для визначення інтенсивності екстремальних кліматичних навантажень наведено в документах МАГАТЕ № 50-80-811А, № 50-80-811В [12, 13], виданих у 1983—1984 рр. У документі МАГАТЕ № NS-G-3.4 [14], виданому в 2005 р. на заміну [12, 13], відповідний математичний апарат суттєво мінімізований (практично відсутній).

3. Результати спостережень за технічним станом сталевих конструкцій свідчать, що протягом терміну їх експлуатації в суттєво напружених елементах можливі виникнення та подальший розвиток (зростання) тріщин (рис. 1). Однією з високоймовірних причин цього явища можуть бути циклічні навантаження на споруду.

Для виконання перевірних розрахунків на витривалість, утому, циклічну тріщиностійкість треба мати вихідну інформацію про параметри фактичних циклічних навантажень за певний період попередньої експлуатації конструкції. У ДБН В.1.2-2:2006 [10] наведено лише положення щодо визначення окремих параметрів технологічних циклічних навантажень від підйомно-транспортного кранового обладнання, що є абсолютно недостатнім для виконання повного комплексу перевірних розрахунків сталевих конструкцій на витривалість, утому, циклічну тріщиностійкість. ДБН В.1.2-2:2006 не містить будь-які рекомендації з визначення необхідних для перевірних розрахунків параметрів кліматичних циклічних навантажень і впливів (вітер, температура, сонячна радіація) на будівельні конструкції, таких як кількість циклів навантаження або впливу за певний період, амплітуда інтенсивності навантаження в циклі, коефіцієнт асиметрії амплітуд у циклі навантаження, періодичність та частота навантаження від вітру, температури, сонячної радіації, кількість циклів навантаження протягом проектного або залишкового терміну експлуатації.

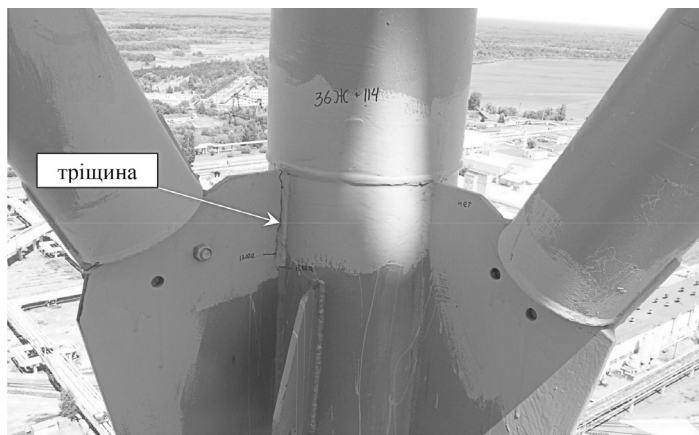


Рис. 1. Тріщина утому в кутовому зварному з'єднанні косинки до стійки каркасу нової витяжної труби споруд II черги Чорнобильської АЕС

4. У ДБН В.2.6-98:2014 [5] зазначено, що цей НД поширюється на проектування сталевих конструкцій, які функціонують в умовах температур навколишнього середовища не вище за 100 °С при можливому короткочасному



Рис. 2. Корозійні пошкодження та викривлення елементів сталевих каркасу (колони) в процесі експлуатації

(неаварійному, а також не пов'язаному з особливими умовами або надзвичайними ситуаціями) підвищенні температури до 150 °С. Отже, положення ДБН В.2.6-198:2014 за формальною ознакою не можна застосовувати для виконання перевірних розрахунків працездатності сталевих конструкцій в аварійних умовах, зокрема при температурах, вищих за 150 °С.

Крім того, в ДБН В.2.6-198:2014 вказано, що цей НД встановлює вимоги до проектування зведення, реконструкції та ремонту сталевих конструкцій, а також до визначення придатності наявних конструкцій до експлуатації. Отже, вимоги [5] треба застосовувати для перевірних розрахунків і наявних сталевих конструкцій АЕС з пошкодженнями — тріщинами, деформованими елементами, порушеннями (непроектним станом) зварних та болтових з'єднань, корозійними ураженнями тощо (див. рис. 1, 2).

Мета цієї роботи — проаналізувати ДБН В.2.6-198:2014 [5] і ДСТУ Б В.2.6-210:2016 [6] на предмет повноти, достатності та відповідності їх вимог задачам розрахункового обґрунтування міцності наявних сталевих конструкцій (для несейсмічних навантажень), а також визначити склад дій у виконанні подібних розрахунків з урахуванням дефіциту методологічних положень у НД [5, 6].

Таблиця 7.4 ДБН В.2.6-198:2014 [5]. Формули для визначення розрахункових опорів болтових з'єднань

Напружений стан	Умовна позначка	Розрахунковий опір одноболтового з'єднання розрізу, розтягу, зминанню для болтів					
		класу міцності					Високоміцних із сталі марки 40X «селект»
		5.6	5.8	8.8	10.9	12.9	
Зріз	R_{bs}^1	$0,42 R_{bun}$	$0,42 R_{bun}$	$0,40 R_{bun}$	$0,40 R_{bun}$	$0,35 R_{bun}$	$0,37 R_{bun}$
Розтяг	$R_{bt}^{1,2}$	$0,75 R_{bun}$	$0,75 R_{bun}$	$0,68 R_{bun}$	$0,60 R_{bun}$	$0,50 R_{bun}$	$0,50 R_{bun}$
Зминання: болти класу точності А	R_{bp}^3	$1,60 R_u$					
болти класу точності В і С							

¹ Значення R_{bs} і R_{bt} для болтів класу міцності 8.8 і 10.9 та із сталі марки 40X «селект» наведені для болтів без покриття (наприклад, без оцинкування, алюмініювання).
² Значення R_{bt} вказано для болтів з додатковим подальшим відпуском за температури 650 °С.
³ Значення R_{bp} вказано для з'єднуваних елементів із сталі з границею текучості до 440 Н/мм² і при $R_{bun} > R_{уно}$.

Таблиця Д.4 ДБН В.2.6-198:2014 [5]. Характеристичні опори сталі болтів і розрахункові опори одноболтових з'єднань зрізу і розтягу, Н/мм²

Клас міцності болтів	R_{bun}	R_{byn}	R_{bs}	R_{bt}
5,6	500	300	210	225
5,8	500	400	210	—
8,8	800	640	320	435
10,9	1000	900	400	540
12,9	1200	1080	420	—
40X «селект»	1100	990	405	550

Примітка. В таблиці вказані значення розрахункових опорів, обчислені із округленням до 5 Н/мм².

Основні тематичні аспекти, що розглядаються в статті: розрахунки на міцність (на опір в'язкому руйнуванню); розрахунки на опір крихкому руйнуванню; розрахунки на утому; визначення характеристик тріщиностійкості сталей; визначення параметрів циклічних навантажень на сталеві конструкції; розрахунки сталевих конструкцій на циклічну тріщиностійкість.

Методологічні положення, що стосуються розрахункових обґрунтувань міцності сталевих будівельних конструкцій і є предметом розгляду в цій роботі, наведені, зокрема, в НД [1–10].

Основний зміст цієї роботи полягає у визначенні некоректностей у НД [5, 6], а також наданні рекомендацій щодо їх виправлення. Насамперед, мають бути усунені некоректності в формулах для визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) і міцності сталевих конструкцій.

Зокрема, в ДБН В.2.6-198:2014 [5, табл. 7.4]* наведено формули для визначення розрахункового опору бол-

тових з'єднань. Розрахунки за формулами [5, табл. 7.4] для болтів класу міцності 5.6, 8.8, 10.9 (вони затушовані на наведеному оригіналі цієї таблиці) дають результати, які не узгоджуються із [5, табл. Д.4]. Порівняння значень R_{bt} , наведених у [5, табл. Д.4] і обчислених за формулами [5, табл. 7.4], свідчить, що між ними є суттєві відмінності (табл. 1).

Таблиця 1. Порівняння значень R_{bt} , наведених у [5, табл. Д.4] і обчислених за формулами [5, табл. 7.4]

Клас міцності болтів	Значення R_{bt} , Н/мм ² , за даними		Розбіжність, %
	[5, табл. Д.4]	[5, табл. 7.4]	
5.6	225	375	40,0
8.8	435	544	20,0
10.9	540	600	10,0

* У наведених в статті таблицях ДБН В.2.6-198:2014 збережено їхню нумерацію згідно з першоджерелом.

У [5, формули (16.12), (16.13), (16.14)] мають місце некоректності щодо процедури визначення розрахункового зусилля, яке може бути сприйняте одним болтом. Замість формул

$$\begin{aligned} N_{bs} &= R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_C \gamma_n; \\ N_{bp} &= R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_C \gamma_n; \\ N_{bt} &= R_{bt} A_{bn} \gamma_C \gamma_n \end{aligned}$$

мають бути наведені співвідношення

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_C; \quad (1)$$

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_C; \quad (2)$$

$$N_{bt} = R_{bt} A_{bn} \gamma_C. \quad (3)$$

Згідно з чинною системою НД України в галузі будівництва коефіцієнт надійності за відповідальністю γ_n , як правило, не входить до формул з визначення граничного розрахункового зусилля, яке може бути сприйняте елементом. Вплив коефіцієнта надійності за відповідальністю γ_n застосовується у визначенні розрахункового навантаження (зусилля), яке порівнюється з гранично допустимими значеннями, які фігурують у лівій частині формул (1)–(3).

У [5, п. 16.2.13] наведено формулу (16.16) для визначення гранично допустимого зусилля розтягу в найнапруженішому болті з'єднання. Оскільки зазначений пункт НД не містить відповідних вимог для випадку позакентровано розтягу болта та (або) наявності згинального моменту в болті (наприклад, внаслідок застосування «косих» шайб або неперпендикулярності площини шайби до осі болта в разі потрапляння під шайбу стороннього предмета), то його (тобто п. 16.2.13) доцільно доповнити таким положенням:

«У разі впливу на болти згинального моменту несучу здатність найнапруженішого болта, крім розрахунку за [5, формули (16.12) і (16.14)], також потрібно перевіряти за формулою

$$\sqrt{(\gamma_n N_s / N_{bs})^2 + (\gamma_n N_t / N_{bt} + \gamma_n M_t / M_{bt})^2} \leq 1,$$

де N_s , N_{bs} , N_p , N_{bt} визначені в [5, п. 16.2.13]; M_t — розрахунковий згинальний момент у болті; M_{bt} — гранично допустимий для болта згинальний момент, який визначається за формулою

$$M_{bt} = \frac{2 \cdot I_b \cdot R_{bt} \cdot \gamma_C}{d_b},$$

де R_{bt} , γ_C , d_b визначені в [5]; I_b — момент інерції перерізу болта».

Замість співвідношення, наведеного у [5, формула (9.39)], —

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_C} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1,$$

має бути

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_C} \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq 1.$$

У [5, формула (14.1)]

$$\frac{\gamma_m}{R_y \gamma_C} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$$

замість коефіцієнта γ_m має бути коефіцієнт γ_n :

$$\frac{\gamma_n}{R_y \gamma_C} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1.$$

У [5, п. 16.1.19] розглядається випадок зварного з'єднання з кутовим швом (рис. 3) під впливом зусиль N , Q і крутильного моменту Mz , який діє у площині з'єднання. Згідно з [5, формула (16.9)], дотичне напруження τ в небезпечній точці розрахункового перерізу кутового шва зварного з'єднання визначається за формулою

$$\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + (\tau_Q + \tau_{My})^2},$$

де τ_N , τ_Q — дотичні напруження в зварному шві, спричинені зусиллями N і Q ; τ_{Mx} , τ_{My} — дотичні напруження в зварному шві в напрямках осей x і y , спричинені крутильним моментом Mz .

Для складнішого випадку, коли додатково до зусиль N , Q і Mz є перпендикулярне до площини з'єднання зусилля P , а також діючі навколо горизонтальних осей згинальні моменти Mx та (або) My , дотичне напруження τ в небезпечній точці розрахункового перерізу кутового шва зварного з'єднання треба визначати за формулою

$$\tau = \sqrt{(\tau_N + \tau_{Mx})^2 + (\tau_Q + \tau_{My})^2 + (\tau_P + \tau_{Mz})^2}.$$

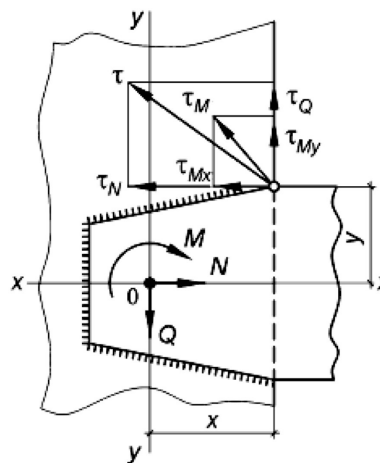


Рис. 3. Розрахункова схема зварного з'єднання з кутовими швами [5, рис. 16.5]

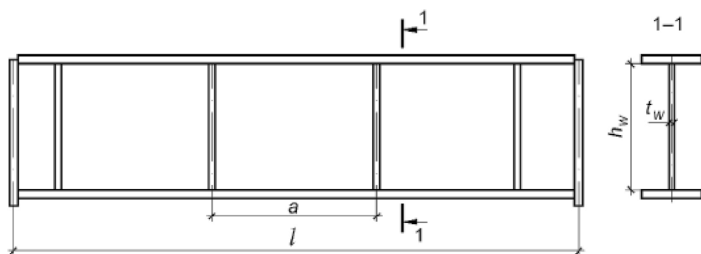


Рис. 4. Схема балки з гнучкою стінкою [5, рис. 22.1]

У [5, п. 22.2] розглянуто визначення міцності розрізних балок симетричного двотаврового перерізу, які несуть статичне навантаження і мають згин у площині стінки. Але наведені у [5, п. 22.2] формули не охоплюють усіх можливих проектних (експлуатаційних) випадків. У разі, коли дві або більше балок (рис. 4) з'єднані між собою на рівні верхнього поясу, наприклад рейкою кранової колії, в балці під час гальмування крана виникають не лише згинальний момент M і поперечна сила Q , але й повздовжня сила N . Критерієм забезпечення міцності балки з гнучкою стінкою буде дотримання таких умов:

$$\begin{aligned} (\gamma_n M / M_u)^4 + (\gamma_n Q / Q_u)^4 &\leq 1; \\ (\gamma_n M / M_u + \gamma_n N / N_u)^4 + (\gamma_n Q / Q_u)^4 &\leq 1; \\ \sqrt{(\gamma_n Q / Q_u)^2 + (\gamma_n N / N_u + \gamma_n M / M_u)^2} &\leq 1, \end{aligned}$$

де M , N , Q і M_u , N_u , Q_u — відповідно три розрахункові і три гранично допустимі значення зусиль у перерізі балки.

У [5, п. 11.2] вказано, що для вузла спирання сталевих колон на фундамент «Товщину опорної плити слід визначати з умови міцності при згині за формулою

$$t \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\max} \cdot \gamma_n}{R_y \gamma_C}},$$

де γ_C — коефіцієнт умов роботи опорної плити ... ; M_{\max} — найбільший із згинальних моментів M , що діють на різних ділянках опорної плити...».

Коректний запис формули для визначення товщини опорної плити має бути таким:

$$t \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\max} \cdot \gamma_n}{R_y \gamma_C \cdot b}},$$

де b — ширина перерізу опорної плити.

Важливими для безпеки елементами великопрогінних конструкцій є їх опорні частини. Такі опорні частини поділяють на шарнірно нерухомі (або балансірні з шарнірами, рис. 5, а) і шарнірно рухомі (з рухомими котками, рис. 5, б).

Згідно з [5, формула (М.1)], згинальний момент в опорній плиті для випадку, коли плита спирається на фундамент усією своєю поверхнею, має визначатися так:

$$M = 0,5qc^2,$$

де c — виліт консольної ділянки плити; q — реактивний тиск основи на одиницю площі під розглянутою ділянкою плити, Н/мм².

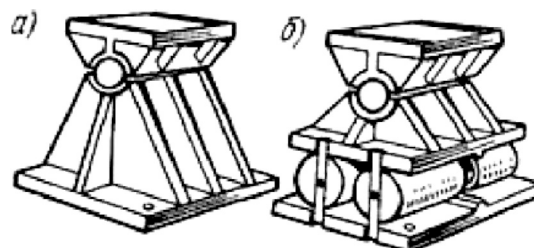


Рис. 5. Види опорних частин великопрогінних сталевих конструкцій:
а — нерухома опора з шарніром; б — рухома опора

Цій формулі притаманна низка некоректностей.

По-перше, в формулі не дотримується розмірність, а саме: розмірність результату виразу в правій частині формули (Н/мм²·мм² = Н) не відповідає фізично визначеній розмірності згинального моменту M (Н·мм) в лівій частині формули.

По-друге, якщо фундамент суттєво жорсткий і опорна плита не деформується (не вигинається), то згинальний момент у плиті $M = 0$. Таким чином, наведена формула є незастосовною для випадків спирання плити на суттєво жорстку основу. З метою усунення вказаної некоректності згинальний момент у плиті пропонується визначати за формулою

$$M_{\max} = \frac{EI}{\rho_{\max}}, \quad (4)$$

де EI — згинальна жорсткість перерізу опорної плити; ρ_{\max} — найбільша кривизна поверхні контакту фундаменту і опорної плити, спричинена їх деформуванням під навантаженням.

Згідно з формулою (4), у гіпотетичному випадку, коли фундамент є абсолютно жорстким, $\rho_{\max} = \infty$, $M_{\max} = 0$.

Для консольної ділянки опорної плити, яка спирається усією своєю площиною на фундамент, згинальний момент може бути визначений за формулами

$$\begin{aligned} M_{\max, a} &= \frac{3EI \cdot \Delta v}{(0,5a)^2} = \frac{2EI \cdot \theta}{0,5a}, \\ M_{\max, b} &= \frac{3EI \cdot \Delta v}{(0,5b)^2} = \frac{2EI \cdot \theta}{0,5b}, \end{aligned}$$

де Δv — різниця вертикальних прогинів у середині та на краю опорної плити вздовж її сторони a (або b) при деформації фундаменту під навантаженням; θ — кут відхилення поверхні плити від вихідного положення вздовж сторони плити a (або b) при деформації фундаменту під навантаженням.

Визначаючи згинальний момент в опорній плиті конструкції у випадку, коли плита спирається на фундамент усією своєю поверхнею, замість [5, формула (М.2)]

$$M = \alpha_p q b_p^2$$

має бути

$$M = \alpha_p q \cdot a_p b_p^2.$$

Згідно з [5, п. 12.2], розрахунок на діаметральне стиснення котків треба виконувати за формулою

$$\frac{\gamma_n \cdot F}{n \cdot d \cdot l \cdot R_{cd} \cdot \gamma_C} \leq 1,$$

де n — кількість котків; d, l — діаметр і довжина котка, відповідно; R_{cd} — розрахунковий опір діаметральному стиску при вільному дотиканні.

З останньої формули випливає, що напруження на площині стискання, перпендикулярній лінії діаметрального стискання,

$$\sigma = \frac{\gamma_n \cdot F}{n \cdot d \cdot l}. \quad (5)$$

Водночас у [15] вказано, що контактні напруження залежать від коефіцієнта Пуассона ν та модуля пружності матеріалів E і зростають повільніше, ніж інтенсивність навантаження (F), тоді як напруження розтягу, стиску, кручення і згину зростають прямо пропорційно інтенсивності навантаження і не залежать від пружних сталей матеріалу. Відповідно до методології, викладеної в [15], напруження на площині стискання, перпендикулярній лінії діаметрального стискання, мають визначатися за формулою

$$\sigma = \frac{0,8 \cdot \gamma_n}{n} \sqrt{\frac{F}{2r \cdot K \cdot l}}, \quad (6)$$

де $K = k_1 + k_2$ — коефіцієнт сумарної жорсткості котка (k_1) і опори (k_2), $k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1}$, $k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$; F — інтенсивність навантаження на опору (на коток), опірна реакція; r — радіус котка; E_1, E_2, ν_1, ν_2 — модулі пружності та коефіцієнти Пуассона матеріалів котка й опори.

Якщо підставити числові значення параметрів у формули (5) і (6), то результати розрахунку напружень σ в діаметральному перерізі циліндричного котка відрізняться. Але вочевидь, що в разі вільного контакту циліндричних котків з горизонтальною поверхнею опорної плити площа контакту буде меншою за добуток $n \cdot d \cdot l$, як прийнято в формулі (5). Це доводить технічну некоректність [5, формула (12.2)].

Згідно з [5, п. 12.1], «Розрахунок на зминання в циліндричних шарнірах (цапфах) балансирних опор слід виконувати за формулою ...:

$$\frac{\gamma_n \cdot F}{1,25 \cdot r_a \cdot l_a \cdot R_{fp} \cdot \gamma_C} \leq 1,$$

де F — тиск (сила) на опору; r_a, l_a — радіус і довжина котка; R_{fp} — розрахунковий опір місцевому зминанню при щільному дотиканні ...».

З цієї формули випливає, що напруження по площині стискання циліндричного шарніра і циліндричної цапфи однакових діаметрів дорівнює

$$\sigma = \frac{\gamma_n \cdot F}{1,25 \cdot r_a \cdot l_a}. \quad (7)$$

Порівняння формул (5) і (7) свідчить, що згідно з [5] розрахункова площа контакту одного ($n = 1$) циліндричного котка і плоскої опорної плити $n \cdot d \cdot l = 2r \cdot l$ є більшою за площу контакту циліндричного шарніра в циліндричній цапфі $1,25r \cdot l$, а це суперечить технічним особливостям взаємодії означених конструктивних елементів і доводить, що [5, формула (12.1)] (див. формулу (7)) є некоректною.

Некоректною є й [5, формула (Р.3)] для визначення розрахункової довжини сталевих елементів, розкріпленого в'язями в одній площині: замість рівняння

$$l_{ef} = \sqrt{0,36 + 0,59\alpha^3} \geq 0,6l$$

має бути

$$l_{ef} = \left(\sqrt{0,36 + 0,59\alpha^3} \right) \cdot l \geq 0,6l.$$

Як вже було наголошено, протягом експлуатації сталевих конструкцій в їх елементах можливе утворення й розвиток (зростання) тріщин. У ДБН В.2.6-198:2014 [5] викладено узагальнені вимоги із запобігання утворенню тріщин; конкретні вимоги та рекомендації (формули) щодо розрахунку на опір крихкому руйнуванню сталевих конструкцій та зварних з'єднань, в яких є тріщини, не наведені. Відсутні вимоги та рекомендації й щодо розрахунку зварних з'єднань з тріщинами на опір в'язкому руйнуванню при дії динамічних навантажень, а також при впливі низьких температур, які підвищують схильність матеріалів до крихкого руйнування.

У [5, п. 5.3.5] сказано: «Залежно від можливості та причин досягнення граничних станів, а також виходячи з умов руйнування від утоми чи крихкого руйнування слід розрізняти три категорії конструкцій та їх елементів: I — конструкції та елементи, досягнення граничних станів яких можливе в результаті безпосереднього впливу динамічного рухомого чи вібраційного навантаження; II — конструкції та елементи, досягнення граничних станів яких можливе лише при поєднанні несприятливих чинників (динамічного чи вібраційного навантаження, концентраторів напружень, зон напружень розтягу тощо); III — конструкції та елементи, досягнення граничних станів яких внаслідок утоми чи крихкого руйнування неможливо через відсутність несприятливих чинників».

Вочевидь, актуальними питаннями є визначення можливостей та причин досягнення граничних станів, а також відмінності формул, за якими треба перевіряти міцність при пластичному і крихкому руйнуванні, розраховувати інтенсивність явищ (процесів) вичерпання витривалості, утомного руйнування і циклічного зростання тріщин. У [5] ці питання не розглянуто.

Згідно з ДБН В.1.2-14-2009 [4, п. 6.2.2], для елементів конструкцій, розміри яких дозволяють нехтувати масштабним ефектом, для статичних і квазістатичних навантажень при температурах експлуатації від мінус 40 °С до плюс 150 °С в загальному випадку розглядають такі граничні стани елементів і конструкцій (належать до I групи граничних станів):

- пластичне (в'язке) руйнування;
- крихке руйнування;
- руйнування в результаті утоми;
- втрата стійкості положення;

перехід конструкції в змінну систему;
якісна зміна конфігурації конструкції;
інші явища (наприклад, перфорація стінок ємностей, надмірні переміщення основи в разі просадок чи спучування ґрунтів).

Вочевидь, доцільно визначити (виходячи з теоретичних основ механіки деформівного твердого тіла) зміст термінів «крихке» і «в'язке» (або «пластичне») руйнування, зважаючи на відсутність відповідних положень у [4].

Крихке руйнування:

варіант 1. Руйнування (найчастіше — раптове), що супроводжується утворенням малих деформацій, яке виникає, зазвичай, за наявності концентраторів напружень, низьких температур і ударних впливів (дій) (див. [5, п. 3.12]);

варіант 2. Руйнування без слідів пластичних деформацій в матеріалі (див. [11, п. 40]);

варіант 3. Руйнування, яке виникає внаслідок зростання тріщини критичного розміру для рівня наявних напружень зі швидкістю, близькою до швидкості розповсюдження пружної хвилі в матеріалі (рис. 6, а).

В'язке руйнування:

руйнування, яке, зазвичай, відбувається повільно та супроводжується пластичною деформацією (див. [5, п. 3.38], рис. 6, б).

Квазікрихке руйнування:

руйнування, при якому сліди пластичних деформацій на поверхні злому не перевищують 50 % площі зазначеної поверхні (рис. 6, в).

Далі потрібно визначити критерії міцності для в'язкого, крихкого і квазікрихкого руйнування.

Критерій міцності для випадку *в'язкого руйнування*, нехтуючи коефіцієнтами надійності, може бути записаний у вигляді

$$\sigma/R \leq 1,$$

де σ — зведені напруження в перерізі без тріщин; R — розрахунковий опір матеріалу.

Критерій міцності для випадку *крихкого руйнування* тіла з тріщиною, нехтуючи коефіцієнтами надійності, узагальнено може бути записаний у вигляді

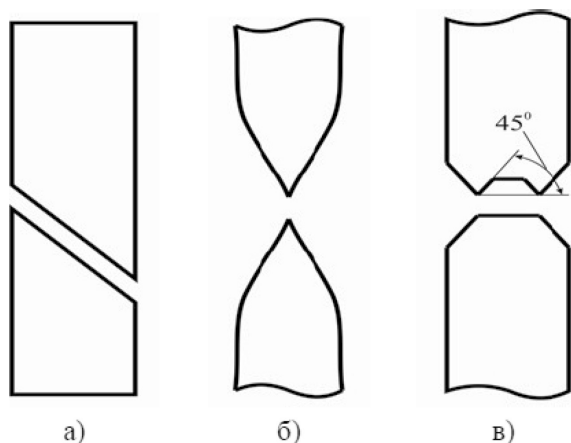


Рис. 6. Різновиди руйнування металу при осьовому розтягненні круглого в перерізі стрижня:
а — крихке; б — в'язке; в — квазікрихке

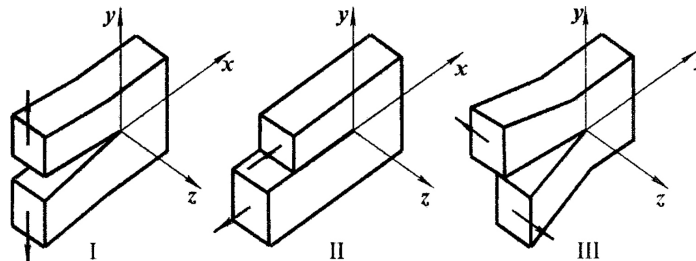


Рис. 7. Різновиди переміщення берегів тріщин (різновиди руйнувань), притаманних станам поверхнь тріщини:
I — нормальний відрив; II — поздовжній зсув;
III — поперечний зсув

$$K_i/K_{iC} \leq 1,$$

де K_i — коефіцієнт інтенсивності напружень матеріалу тіла з тріщиною за наявності нормального відриву або поперечного чи поздовжнього зсуву поверхнь тріщини; K_{iC} — критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень матеріалу тіла з тріщиною (рис. 7) за наявності нормального відриву або поперечного чи поздовжнього зсуву поверхнь тріщини, визначається згідно з [16].

Критерій міцності для випадку *квазікрихкого руйнування* в загальному вигляді

$$\sqrt{(\sigma/R)^2 + (K_i/K_{iC})^2} \leq 1.$$

Зазначимо, що в ДБН В.2.6-198:2014 [5] навіть не згадується про необхідність визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень у матеріалі тіла з тріщиною, хоча аспекти механіки крихкого руйнування викладають в політехнічних вишах вже щонайменше кілька десятиріч. Як наслідок, НД [5] фактично неможливо застосовувати для оцінки міцності конструкцій, які згідно з [5, п. 5.3.5] належать до I категорії за можливістю досягнення відповідних граничних станів, зокрема відмови внаслідок втоми чи крихкого руйнування, оскільки відсутні процедури (формули) для аналізу (оцінки) параметрів вказаних явищ (процесів).

Більше того, в [5, розділ 9.3], де йдеться про розрахунок на міцність балок суцільного перерізу для кранових колій (які згідно з [5, табл. А.1] належать до I категорії), наведено формули, що відповідають механізму в'язкого руйнування, який притаманний конструкціям, що належать до III категорії.

Маємо також зауваження до методології перевірних розрахунків сталевих конструкцій, що викладена в ДСТУ В.2.6-210:2016 [6, розділ 7]. У цьому НД наведено рекомендації щодо перевірних розрахунків окремих елементів існуючих сталевих конструкцій, але відсутні алгоритми і методи розрахунків конструкцій або споруд залежно від терміну експлуатації, протягом якого всі параметри зовнішніх впливів і технічного стану (навантаження, розміри тріщин, викривлення, міцність, жорсткість окремих елементів і вузлів з'єднання) водночас змінюються в часі. Вочевидь, для споруд відповідні розрахунки треба виконувати в нелінійній постановці в режимі «крок за кроком» з моделюванням і врахуванням на кожному кроці керуючого параметру (часу, інтенсивності навантаження тощо)

відповідних значень інших параметрів технічного стану конструкції об'єкта.

Відсутні в [6] також рекомендації щодо виконання перевірок розрахунків за такими аспектами, як динамічна міцність, довготривала міцність, витривалість, багатогібно-малоциклова втома, вібрустійкість. Не надано рекомендації з визначення параметрів циклічних навантажень і впливів (за винятком кранових циклічних навантажень), зокрема таких, як кількість циклів навантаження або впливу, амплітуда в циклі, коефіцієнт асиметрії амплітуд в одному циклі навантажень, періодичність та частота вітрового навантаження, кліматичної температури, сонячної радіації, кількість циклів згаданих навантажень протягом проектного або залишкового терміну експлуатації. Рекомендації з визначення параметрів циклічних навантажень нема і в ДБН В.1.2-2:2006 [10]. Крім того, не надано алгоритми і методи розрахунку залишкової довговічності матеріалів, з'єднань, елементів та конструкцій за результатами перевірок розрахунків запасів їх міцності, не наведено алгоритми і методи виконання розрахункового обґрунтування залишкового (перепризначеного) ресурсу споруд і конструкцій тощо.

У [6, розділ 7] не викладено підходи до врахування впливу послаблення жорсткості вузлових з'єднань елементів (наприклад, послаблення болтового або руйнування зварного з'єднання) на розрахункові довжини стрижневих елементів, їх прогини, переміщення, несучої спроможності. Зауважимо, що вузлові з'єднання бувають не лише жорстко затиснені або шарнірні, але й не абсолютно жорсткі (частково піддатливі) та не ідеально шарнірні (з наявністю факторів опору або обмеження кута взаємного повороту елементів, що з'єднуються).

В [6, підрозділ 7.2] надано рекомендації щодо врахування впливу дефектів і пошкоджень у перевірних розрахунках статичної міцності сталевих конструкцій, але не розглянуто питання щодо врахування тріщин у зварних з'єднаннях, а також щодо розрахунку зварних з'єднань з тріщинами на циклічну тріщиностійкість та на опір крихкому руйнуванню (див. рис. 1, 7).

У стандартах і технічних умовах, що містять вимоги до механічних характеристик металевих виробів, зокрема в НД [17–23], відсутні значення K_{IC} (критичного коефіцієнта інтенсивності напружень нормального відриву) для марок будівельних конструкційних сталей, що застосовуються у виготовленні елементів, в яких можливе виникнення тріщин. Зазначена обставина не дає змоги виконувати перевірку працездатності існуючих сталевих конструкцій з тріщинами, виготовлених з марок сталей вітчизняних виробників.

За підсумками виконаного аналізу є підстави зробити такі висновки:

1. У чинних нормативних документах України не викладено методологію, процедури і алгоритми (формули) для виконання згідно з вимогами ДБН В.1.2-14-2009 [4] перевірних розрахунків сталевих конструкцій на безвідмовність, живучість, довговічність, працездатність, безпеку.

2. У ДБН В.1.2-2:2006 [10] відсутнє докладне керівництво щодо визначення навантажень на будівельні конструкції від смерчів. Методологію визначення навантажень від екстремальних впливів викладено в керівництвах з безпеки МАГАТЕ [12–14], які не мають статусу обов'язкових для застосування в Україні.

3. У ДБН В.1.2-2:2006 [10] (як і в керівництвах МАГАТЕ [12–14]) не наведено придатних до практичного

застосування підходів до визначення циклічних навантажень на будівельні конструкції. Це унеможливило використання чинних НД України для виконання перевірних розрахунків сталевих конструкцій на витривалість, утому, циклічну тріщиностійкість.

4. У ДБН В.2.6-198:2014 [5] зазначено, що цей НД застосовний для проектування нових та (або) оцінки несучої спроможності існуючих сталевих конструкцій, для яких температура оточуючого середовища не вища за 100 °С (з можливим короткочасним підвищенням температури до 150 °С без ознак надзвичайної ситуації). Отже, ДБН В.2.6-198:2014 [5] за формальною ознакою не може застосовуватися для обґрунтовуючих розрахунків міцності сталевих конструкцій реакторних відділень енергоблоків АЕС, всередині яких температура пароповітряного середовища в аварійних умовах може перевищувати 150 °С.

5. У ДБН В.1.2-2:2006 [10], ДСТУ Б В.2.6-210:2016 [6], а також в інших будівельних НД України відсутні характеристики тріщиностійкості сталей, призначених для виготовлення виробів, в яких можливе виникнення і розвиток тріщин. Як наслідок, унеможливується нормативно регламентоване виконання розрахунків сталевих конструкцій на опір крихкому руйнуванню та циклічну тріщиностійкість.

6. У ДБН В.1.2-2:2006 [10] і ДСТУ Б В.2.6-210:2016 [6] не наведено розрахункову методологію і відповідні формули, які визначають технологію виконання перевірних розрахунків сталевих конструкцій на опір крихкому руйнуванню, малоцикловою втомою, циклічну тріщиностійкість.

7. Чинну редакцію ДБН В.2.6-198:2014 [5] за формальною ознакою не можна застосовувати у проектуванні конструкцій та елементів, які згідно з [5, п. 5.3.5] належать до I та II категорій залежно від можливості та причин досягнення граничних станів, а також виходячи з умов руйнування (від втоми або крихкого руйнування). Фактично, під дію ДБН В.2.6-198:2014 не підпадає суттєва частина видів сталевих будівельних конструкцій промислових і цивільних об'єктів (див. [5, Додаток А (довідковий)]. Категорії конструкцій за призначенням і за напруженим станом та групи конструкцій), оскільки подібні сталеві конструкції треба перевіряти на опір крихкому руйнуванню і на міцність (опір в'язкому руйнуванню), а регламентовані методології, процедури та алгоритми, що визначають порядок (технологію) виконання зазначених розрахунків, у ДБН В.2.6-198:2014 та в інших чинних галузевих НД не наведені і ще тільки мають бути розроблені, затверджені й введені в дію.

Вимоги чинних НД України також не регламентують питання оцінки придатності до експлуатації існуючих конструкцій з тріщинами, конструкцій, що мають корозійні ураження у вигляді виразок (потенційні чинники утворення і зростання тріщин), конструкцій, що експлуатуються при температурах нижчих за мінус 40 °С (ударна в'язкість визначається при температурі мінус 40 °С і для нижчих температур є невідомою).

Вимоги зазначених норм не поширюються на існуючі конструкції, які експлуатуються під впливом циклічних навантажень з амплітудою напружень, яка досягає рівня $\sigma_a \geq 0,9R_{yt}$. Такі навантаження спричиняють малоцикловою втомою, яка супроводжується утворенням смугастої внутрішньої структури матеріалу (рис. 8) та мікроскопічних тріщин завдовжки 0,5 мм і більше. Для зазначеного стану матеріалу потрібно виконувати розрахунки конструкції на циклічну тріщиностійкість.

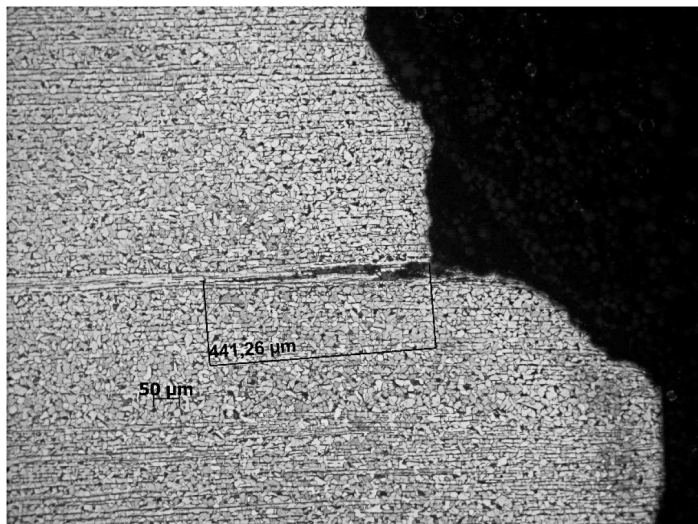


Рис. 8. Смугаста структура сталі в зоні утворення тріщини

8. У стандартах і технічних умовах, в яких викладено вимоги до механічних характеристик металевих виробів, зокрема в НД [17–23], не наведено значення K_{IC} (критичного коефіцієнта інтенсивності напружень нормального відриву) для марок будівельних конструкційних сталей, з яких виготовляються елементи з можливим виникненням тріщин. Це унеможливує перевірку працездатності сталевих конструкцій з тріщинами, виготовлених із марок сталей вітчизняного виробництва.

Необхідні дії. Зважаючи на викладене, є підстави вважати за доцільне розробити національний НД або внутрішній стандарт оператора АЕС України ДП НАЕК «Енергоатом» з умовною (попередньою) назвою НД «Вимоги до проектування і оцінки працездатності сталевих конструкцій ядерних установок». У цьому документі мають бути висвітлені актуальні питання, що не розглянуті або некоректно викладені в загальнобудівельних національних НД; крім того, потрібно навести спеціалізовані, обумовлені особливостями функціонування ядерних установок, вимоги до проектування й оцінки працездатності сталевих конструкцій. Зокрема, пропонуємо навести:

формули для розрахунку параметрів екстремальних навантажень з урахуванням положень керівництва з безпеки МАГАТЕ [12–14];

формули для розрахунку міцності (опору в'язкому руйнуванню) з усуненням перелічених некоректностей у положеннях НД [5, 6];

формули для розрахунку на опір крихкому руйнуванню, циклічну тріщиностійкість, мало- та багатоциклову утому з урахуванням положень сучасних наукових публікацій, наведених в наступному підрозділі;

отримані за результатами наукових досліджень значення K_{IC} (критичного коефіцієнта інтенсивності напружень нормального відриву) для застосовуваних у проєктах ядерних установок марок конструкційних сталей, з яких виготовляються елементи з можливим виникненням тріщин.

Методологічна база (наукові публікації) за напрямком розрахунків на міцність і опір крихкому руйнуванню сталевих конструкцій з тріщинами. Методологію (формули) для розрахунків сталевих конструкцій з тріщинами на опір крихкому руйнуванню при центральному розтягу, згині, дії позацинтральної сили та згинального моменту викладено,

зокрема, в [24], процедуру розрахунку болтових з'єднань сталевих конструкцій з тріщинами в болтах — в [25].

Методику розрахунків зварних з'єднань суцільних або з наявними тріщинами сталевих конструкцій на мало- і багатоциклову утому та на циклічну тріщиностійкість наведено в [26], методику розрахунків для випадку наявності тріщин в основному металі — в [27], алгоритм моделювання розвитку тріщин втомі протягом експлуатації сталевих конструкцій — в [28].

Особливості розрахунку сталевих конструкцій залежно від категорії конструкцій за можливістю досягнення граничного стану, а також групи конструкцій згідно з [5, Додаток А] викладено в [29].

Значення K_{IC} (критичного коефіцієнта інтенсивності напружень нормального відриву) для марок будівельних сталей, з яких виготовляються елементи з можливим виникненням тріщин, наведено в [24, 25].

Висновки

За результатами аналізу чинних в Україні НД в частині регламентованих методологій виконання розрахункових обґрунтувань міцності сталевих будівельних конструкцій енергоблоків АЕС, які перебувають в експлуатації, встановлено:

1. У чинних в Україні НД (зокрема [1–11, 16–19]) відсутнє викладення вимог, рекомендацій і процедур (формул) щодо виконання перевірок розрахунків сталевих конструкцій, в яких є або можуть виникнути тріщини, на опір крихкому руйнуванню і циклічну тріщиностійкість.

2. У чинних в Україні НД і стандартах (зокрема [1–11, 16–23]) відсутні характеристики тріщиностійкості будівельних конструкційних сталей, які використовуються для виготовлення елементів з можливим утворенням тріщин. Це унеможливує виконання розрахунків на опір крихкому руйнуванню і циклічну тріщиностійкість сталевих конструкцій з такими елементами, виготовленими з вітчизняних сталей.

3. У чинних в Україні НД не наведено вимоги і методики (формули) стосовно визначення циклічних навантажень на існуючі сталеві конструкції. Це унеможливує виконання «нормативно коректних» розрахунків сталевих конструкцій на витривалість, утому, циклічну тріщиностійкість тощо.

4. Надано посилання на науково-технічні праці, які містять викладення методів розрахунку сталевих конструкцій та їх з'єднань на витривалість, мало- та багатоциклову утому, циклічну тріщиностійкість та опір крихкому руйнуванню, а також посилання на публікації, в яких наведено значення характеристик тріщиностійкості будівельних сталей.

Список використаної літератури

1. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. К. : Держатомрегулювання України, 2008. 58 с.
2. ПиН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. М. : М-во атомной энергетики СССР, 1986. 21 с.
3. СОУ НАЕК 109:2016. Мониторинг строительных конструкций АЭС. Основные положения. К. : ДП НАЭК «Енергоатом», 2016. 48 с.

4. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. К. : М-во регіонального розвитку та будівництва України, 2009. 48 с.

5. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. К. : М-во регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 199 с.

6. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану будівельних сталевих конструкцій, що експлуатуються. К. : Мінрегіон України, 2016. 53 с.

7. НП 306.2.208 2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій. К. : Держатомрегулювання України, 2016. 58 с.

8. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах України. К. : М-во регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 36 с.

9. ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування. К. : М-во регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 199 с.

10. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. К. : М-во будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. 60 с.

11. ДСТУ 2825-94. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять. К. : Держстандарт України, 1994. 40 с.

12. Серия изданий по безопасности, № 50-80-811А. Учет экстремальных метеорологических явлений при выборе площадок АЭС (без учета тропических циклонов). Руководство по безопасности. Вена : Международное агентство по атомной энергии, 1983. 76 с.

13. Safety Series No. 50-SG-S11B. Design Basis Tropical Cyclone for Nuclear Power Plants. A Safety Guide. Vienna : International Atomic Energy Agency, 1984. 56 с.

14. Серия изданий по безопасности, № NS-G-3.4. Учет метеорологических явлений при оценке площадок для атомных электростанций. Руководство по безопасности. Вена : Международное агентство по атомной энергии, 2005. 36 с.

15. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению. М. : Машиностроение, 1969. 243 с.

16. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М. : Госстандарт СССР, 1985. 38 с.

17. ДСТУ 4484:2005/ГОСТ 535-2005. Прокат сортовой і фасонний із сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови. К. : Держспоживстандарт України, 2008. 20 с.

18. ДСТУ ГОСТ 7795:2008. Болты с шестигранной уменьшенной головкой и направляющим подголовком класса точности В. Конструкция и размеры. К. : Держстандарт України, 2007. 15 с.

19. ДСТУ ГОСТ 15590:2008. Болты с шестигранной уменьшенной головкой и направляющим подголовком класса точности С. Конструкция и размеры. М. : Госстандарт СССР, 1970. 7 с.

20. ГОСТ 22356-77. Болты и гайки высокопрочные и шайбы. М. : Госстандарт СССР, 1977. 11 с.

21. ГОСТ 10705-80. Трубы стальные электросварные. Технические условия. М. : ИПК «Изд-во стандартов», 2001. 11 с.

22. ГОСТ 10706-76. Трубы стальные электросварные прямшовные. Технические требования. М. : Госстандарт СССР, 1976. 9 с.

23. ГОСТ 8731-74 (СТ СЭВ 1482-78). Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования. М. : Госстандарт СССР, 1974. 8 с.

24. 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.

25. Шаміс Л. Б. Розрахунок болтових з'єднань на циклічну тріщиностійкість і крихку міцність. *Будівництво України*. 2016. № 1. С. 27—34.

26. 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.

27. Шугайло О. П., Матченко Т. І., Матченко П. Т., Ляшенко Л. А., Панченко А. В. Аналіз підходів до оцінки витривалості

та циклічної тріщиностійкості елементів металевих конструкцій. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2017. № 1(73). С. 9—15.

28. Зубець А.В., Матченко Т. І., Яворська О. І. Алгоритм моделювання розвитку тріщини втомі в конструкційному матеріалі. *Науковий журнал «Вісник НАУ»*. 2004. № 3 (21). С. 137—145.

29. Матченко Т. І., Матченко П. Т. Розрахунок зварних з'єднань сталевих конструкцій, що відносяться до першої та другої груп за можливістю крихкого та в'язкого руйнування. *Зб. наук. праць «Будівельне виробництво»*. 2017. № 61. С. 65—72.

References

1. NP 306.2.141-2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants. [Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii], Kyiv, SNRIU, 2008, 58 p. (Ukr)

2. PiN AE-5.6. Structural Design Standards for NPPs with Different Reactor Types. [Normy stroitel'nogo proektirovaniia AS s reaktorami razlichnogo tipa], Moscow, USSR Ministry of Nuclear Energy, 1986, 21 p. (Rus)

3. SOU NAEK 109:2016. Monitoring of NPP Building Structures. Basic Provisions. [Monitoring stroitel'nykh konstrukttsii AES. Osnovnyie polozheniia], Kyiv, Energoatom Company, 2016, 48 p. (Rus)

4. DBN V.1.2-14-2009. General Principles of Ensuring Reliability and Structural Safety of Buildings, Constructions, Building Structures and Foundations. [Zahalni pryntsy py zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budivel, sporud, budivelnykh konstrukttsii ta osnov], Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2009, 48 p. (Ukr)

5. DBN V.2.6-198:2014. Steel Structures. Design Standards. [Stalevi konstrukttsii. Normy proektuvannia], Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2014, 199 p. (Ukr)

6. DSTU B V.2.6-210:2016. Assessment of the Technical State of Operating Building Steel Structures. [Otsinka tekhnichnoho stanu budivelnykh stalevykh konstrukttsii, shcho ekspluatuiutsia], Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2016, 53 p. (Ukr)

7. NP 306.2.208 2016. Requirements for Seismic Resistant Design and Assessment of Seismic Safety of NPP Power Units. [Vymohy do seismostiikoho proektuvannia ta otsinky seismichnoi bezpeky enerhoblokv atomnykh stantsii], Kyiv, SNRIU, 2016, 58 p. (Ukr)

8. DBN V.1.1-12-2014. Building in Seismic Regions of Ukraine. [Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy], Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2014, 36 p. (Ukr)

9. DSTU B V.2.6-193:2013. Protection of Metal Structures against Corrosion. Design Requirements. [Zakhyst metalevykh konstrukttsii vid korozii. Vymohy do proektuvannia], Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2014, 199 p. (Ukr)

10. DBN V.1.2-2:2006. Loads and Hazards. [Navantazhennia i vplyvy], Kyiv, Ministry of Regional Development, Building and Housing of Ukraine, 2006, 60 p. (Ukr)

11. DSTU 2825-94. Strength Calculations and Testing. Terms and Definition of Main Notions. [Rozrakhunky ta vyprobuvannia na mitsnist. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat], Kyiv, State Standards of Ukraine, 1994, 40 p. (Ukr)

12. Safety Series No. 50-80-811A. Accounting of Extreme Meteorological Phenomena in NPP Siting (without taking into account tropical cyclones). Safety Guide. [Seriiia izdaniia po bezopasnosti, No. 50-80-811A. Uchiot ekstremal'nykh meteorologicheskikh yavlenii pri vybore ploshchadok AES (bez uchiota tropicheskikh tsyklonov. Rukovodstvo po bezopasnosti)], Vienna, IAEA, 1983, 76 p. (Rus)

13. Safety Series No. 50-SG-S11B. Design Basis Tropical Cyclone for Nuclear Power Plants. A Safety Guide, Vienna, International Atomic Energy Agency, 1984, 56 p.

14. Safety Series No. NS-G-3.4. Accounting of Meteorological Phenomena in Assessment of NPP Sites. Safety Guide. [Seriiia izdaniia po bezopasnosti, No. NS-G-3.4. Uchiot meteorologicheskikh yavlenii pri otsenke ploshchadok dlia atomnykh elektrostantsii. Rukovodstvo po bezopasnosti], Vienna, IAEA, 2005, 36 p. (Rus)

15. Pinegin, S. V. (1969), "Contact Strength and Rolling Resistance" [Kontaktnaia prochnost i soprotivleniie kacheniiu], Moscow, Machine Building, 243 p. (Rus)

16. GOST 25.506-85. Strength Calculations and Testing. Methods of Mechanical Metal Testing. Definition of Crack Resistance Characteristics (Fracture Toughness) under Static Loads. [Raschioty i ispytaniia na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniia metallov. Opredeleniie kharakteristik treshchinostoikosti (viazkosti razrusheniia) pri staticheskom nagruzheni], Moscow, USSR State Standards, 1985, 38 p. (Rus)
17. DSTU 4484:2005/GOST 535-2005. Rolled Steel and Structural Steel Made of Usual Quality Carbon Steel. General Technical Specifications. [Prokat sortovyi i fasonnyi iz stali vuhletsevoi zvychnoi yakosti. Zahalni tekhnichni umovy], Kyiv, Ukrainian State Committee for Consumer Policy, 2008, 20 p. (Ukr)
18. DSTU GOST 7795:2008. Bolts with Hexagon Reduced Head and Underhead of Class B Accuracy. Design and Dimensions [Bolty s shestigrannoii umenshennoi golovkoi i napravliaiushchim podgolovkom klassa tochnosti B. Konstruktsiia i razmery], Ukraine State Standards, 2007, 15 p. (Rus)
19. DSTU GOST 15590:2008. Bolts with Hexagon Reduced Head and Underhead of Class C Accuracy. Design and Dimensions [Bolty s shestigrannoii umenshennoi golovkoi i napravliaiushchim podgolovkom klassa tochnosti C. Konstruktsiia i razmery], Moscow, USSR State Standards, 1970, 7 p. (Rus)
20. GOST 22356-77. High Strength Bolts and Nuts and Washers. [Bolty i gaiki vysokoprochnyye i shaiby], Moscow, USSR State Standards, 1977, 11 p. (Rus)
21. GOST 10705-80. Steel Welded Pipes. Technical Specifications. [Truby stalnyie elektrosvarnyie. Tekhnicheskiiie usloviia], Moscow, Standards Publishing House, 2001, 11 p. (Rus)
22. GOST 10706-76. Steel Welded Longitudinal Pipes. Technical Specifications. [Truby stalnyie elektrosvarnyie priamoshovnyie. Tekhnicheskiiie trebovaniia], Moscow, USSR State Standards, 1976, 9 p. (Rus)
23. GOST 8731-74 (ST SEV 1482-78). Steel Weldless Hot-Worked Tubes. Technical Specifications. [Truby stalnyie besshovnyie goriachedeformirovannyie. Tekhnicheskiiie trebovaniia], Moscow, USSR State Standards, 1974, p. (Rus)
24. Matchenko, T. I. (2016), "Calculation of Operated Steel Structure Components for Static Strength and Resistance to Brittle Fracture" [Rozrakhunok stalevykh konstruktsii, shcho znakhodiatsia v ekspluatatsii, na statychnu mitsnist i opir krykhkomu ruinovanni], Science and Construction, No. 2(8), pp. 28–34. (Ukr)
25. Shamis, L. B. (2016), "Calculation of Bolt Joints for Cyclic Crack Resistance and Resistance to Brittle Fracture" [Rozrakhunok boltovykh ziednan na tsyklichnu trishchynostiikist i krykhku mitsnist], Construction in Ukraine, No. 1, pp 27–34. (Ukr)
26. Matchenko, T. I., Shamis, L. B., Matchenko, P. T. (2015), "Calculation of Welding Components of Steel Structures for Resistance and Cyclic Crack Resistance" [Rozrakhunok zvarnykh elementiv stalevykh konstruktsii na vytryvalist i tsyklichnu trishchynostiikist], Construction in Ukraine, No. 1, pp. 37–44. (Ukr)
27. Shuhailo, O. P., Matchenko, T. I., Matchenko, P. T., Liashenko, L. A., Panchenko, A. V. (2017), "Evaluating Approaches to Estimating Endurance and Cyclic Cracking Resistance of Metal Structure Components" [Analiz pidkhodiv do otsinky vytryvalosti ta tsyklichnoi trishchynostiikosti elementiv metalevykh konstruktsii], Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 1(73), pp. 9–15. (Ukr)
28. Zubetsk, A. V., Matchenko, T. I., Yavorska, O. I. (2004), "Algorithm in Modeling of Fatigue Crack Progression in Structural Material" [Alhorytm modeliuвання rozvytku trishchiny vtomy v konstruktsiinomu material], National Aviation University Scientific Journal, No. 3(21), pp. 137–145. (Ukr)
29. Matchenko, T. I., Matchenko, P. T. (2017), "Calculation of Welding Joints in Steel Structures Related to First and Second Groups According to Brittle and Ductile Fracture" [Rozrakhunok zvarnykh ziednan stalevykh konstruktsii, shcho vidnosiatsia do pershoi ta druhoi hrup za mozhlyvisti krykhkoho ta viazkoho ruinovanni], Collection of Scientific Efforts "Construction Operations", No. 61, pp. 65–72. (Ukr)

Надійшла 14.08.2017.