

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВИХ ФЕРМ МАШИННИХ ЗАЛІВ АЕС

© 2011 р. Т. І. Матченко¹, Л. Б. Шаміс¹, О. Т. Матченко², Л. Ф. Первушова¹

¹ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», Київ

²ЗАТ «Науково-технічний центр «Ресурс», Київ

Викладено методику оцінки залишкового ресурсу елементів сталевих ферм унаслідок деформацій повзучості.

Ключові слова: ресурс, довговічність, методика.

Вступ

Перекриття машинних залів АЕС з реакторами ВВЕР-1000 і ВВЕР-400, як правило, виконується з використанням сталевих ферм. У процесі експлуатації елементи сталевих ферм можуть зазнавати впливу від коливань температури, сейсмічних навантажень, навантажень від технологічного обладнання, що може призвести до викривлення деяких елементів ферм. При значних напруженнях в елементах ферм можуть розвиватися деформації повзучості. У стиснутих елементах, що мають викривлення, деформації повзучості призводять до зростання викривлення, яке з часом може призвести до втрати стійкості стиснутого елемента з викривленням. Таким чином, одним із варіантів вичерпання ресурсу сталевих елементів ферми є зростання деформацій повзучості в часі, доки не відбудеться втрата стійкості цього елемента.

Основний зміст

Розрахункова оцінка напружень у стиснутих елементах із викривленням

Стиснуті суцільно стінчасті елементи металевих конструкцій, що мають загальне викривлення, треба розраховувати як позацентрово стиснуті. Відмінність роботи викривлених стержнів від позацентрово стиснутих рекомендується враховувати множенням стрілки викривлення в ненавантаженому стані стержня f_0 на поправочний коефіцієнт k переходу від максимальної стрілки викривлення до еквівалентного ексцентриситету, приймаючи $m_{ef} = k \cdot \eta \cdot m_f$, де $m_f = \frac{f_0 A}{W}$.

Поправочний коефіцієнт обчислюють за формулою

$$k = 0.82 + \frac{0.1}{\bar{\lambda}} \sqrt{\eta \cdot m_f}, \quad (1)$$

де $\bar{\lambda}$ – умовна гнучкість стержня в площині викривлення; η – коефіцієнт впливу форми перерізу, який приймається з [1].

Облік згинальних моментів, що виникають від місцевого позаузлового навантаження, розцентрування у вузлах або від пружного затиснення стержня, виконується незалежно від обліку викривлення. Ексцентриситет від згинального моменту підсумовується з еквівалентним ексцентриситетом від викривлення.

Стрілка викривлення стержня в ненавантаженому стані визначається за формулою

$$f_0 = \psi_0 f'_{вик}, \quad (2)$$

де $f'_{вик}$ – повна стрілка викривлення, заміряна при навантаженні стержня силою N'_0 ; ψ_0 – поправочний коефіцієнт ($0 \leq \psi_0 \leq 1$), обчислений за формулою

$$\psi_0 = 1 - \frac{\bar{\lambda}^2 \sigma'_{вук}}{\pi^2 R_y}, \quad (3)$$

де $\sigma'_{вук} = \frac{N'_0}{A_{ef}} \leq \frac{\pi^2 E}{\bar{\lambda}^2}$ – напруга в стержні під час заміру стрілки $f'_{вук}$; R_y – розрахунковий опір сталі.

Якщо зусилля в стержні N'_0 під час заміру стрілки визначити неможливо, слід приймати $\psi_0 = 1$.

Розрахунок на стійкість стиснутих стержнів з двох спарених кутиків, що розміщені в тавр і мають викривлення у двох площинах, треба робити за формулою

$$\sigma = \frac{N}{\varphi_{uv} A_{ef}} \leq \gamma_c R_y, \quad (4)$$

де φ_{uv} – коефіцієнт зниження несучої здатності, що визначається як менше з трьох величин:

$$\varphi_{uv,1} = \varphi, \quad (5)$$

$$\varphi_{uv,2} = A_1(1 - B_1 \bar{V}_0), \quad (6)$$

$$\varphi_{uv,3} = A_2(1 - B_2 \bar{V}_0 - C_2 \sqrt{\bar{U}_0}) \quad (7)$$

залежно від умовної гнучкості в площині симетрії перерізу

$$\bar{\lambda}_x = \frac{l_{0x}}{i_x} \sqrt{\frac{R_y}{E}} \quad (8)$$

і умови відносних стрілок викривлення

$$\bar{U}_0 = \frac{f_{x0}}{l_{0x}} \sqrt{\frac{E}{R_y}}, \quad \bar{V}_0 = \frac{f_{y0}}{l_{0y}} \sqrt{\frac{E}{R_y}} \quad (9)$$

у площині та з площини симетрії відповідно.

При цьому для елементів ферм (крім опорних розкосів і опорних стояків) треба враховувати пружне затиснення в поясах, приймаючи в площині форми коефіцієнт наведення розрахункової довжини $\mu_x = 0.8$

Коефіцієнти з формул (5) - (7) визначаються за табл. 5 [2], де f_{x0} і f_{y0} – стрілки викривлення в ненавантаженому стані.

Значення критично допустимих вигинів елементів ферм і рам наведено в табл. 10 [2].

Оцінка залишкового ресурсу

За умов повзучості може втрачатися стійкість стиснутих стержнів, оскільки з плином часу напруги меншають, то критична напруга стійкості також меншає. Наближено критичні напруги при повзучості можна визначити, приймаючи, що елемент конструкції втрачає стійкість і руйнується тоді, коли його деформація повзучості сягає критичного значення $\varepsilon_{кр}$.

$$\varepsilon = \varepsilon_{кр}. \quad (10)$$

На дільниці усталеної повзучості

$$\varepsilon = \sigma/E + k\sigma^n t. \quad (11)$$

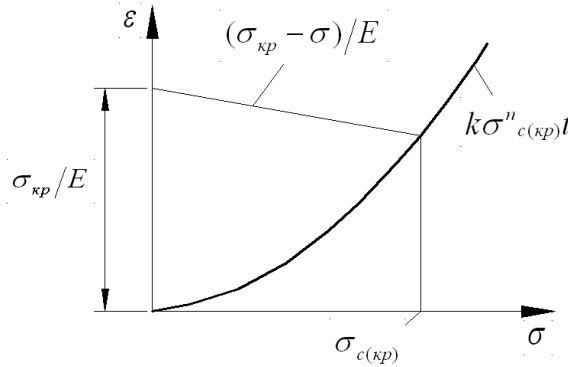
Критичну деформацію визначимо як деформацію, що відповідає критичній (ейлеровій) нарузі $\sigma_{кр}$ в елементі

$$\varepsilon_{кр} = \sigma_{кр}/E. \quad (12)$$

Підставивши вирази (11) і (12) у вираз (10), одержимо

$$\sigma_{c(кр)} / E + k \sigma_{c(кр)}^n t = \sigma_{кр} / E. \quad (13)$$

Напруга $\sigma_{c(кр)}$ в рівнянні (13) є критичною напругою деталі при повзучості. Її можна визначити, задаючись строком служби t . Рівняння (13) найпростіше розв'язати графічно, для чого в координатах $\varepsilon - \sigma$ будують функції $k \sigma_{c(кр)}^n t = (\sigma_{кр} - \sigma) / E$ (рисунок). Можна зробити й інакше: задаючи критичну напругу при повзучості $\sigma_{c(кр)}$ за формулою (13), визначити критичний час $t_{кр}$.



Графік функції $k \sigma_{c(кр)}^n t = (\sigma_{кр} - \sigma) / E$

Якщо знехтувати пружною деформацією порівняно з пластичною, тобто прийняти $\sigma_{c(кр)} / E = 0$, то з рівняння (13) випливає, що

$$\sigma_{c(кр)} = (\sigma_{кр} / E k t)^{1/n}. \quad (14)$$

Якщо задати робочу напругу σ в елементі, то поклавши $\sigma_{c(кр)} = \sigma$ і використовуючи вираз (14), можна знайти критичний час

$$t_{кр} = \sigma_{кр} / E k \sigma^n. \quad (15)$$

Для конструкційних сталей $n = 3$. Значення коефіцієнта k для конструкційних будівельних сталей наведено в таблиці.

Сталь за ГОСТ 27772-88	Марка сталі	Значення коефіцієнта k , МПа ⁻³ /год			
		Температура, °С			
		0...100	100...200	200...300	300 і більше
C235	ВСтЗкп2 ВСтЗкп2-1 18кп	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-11}$
C245	ВСтЗпс6 (листовий прокат товщиною до 20 мм, фасонний – до 30 мм) ВСтЗпс6-1 18пс	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-11}$
C255	ВСтЗсп5, ВСтЗГпс5, ВСтЗпс6 (листовий прокат товщиною з 20 до 40 мм, фасонний – більше 30 мм) ВСтЗпс5-1, ВСтЗГпс5-1, 18сп, 18Гпс, 18Гсп	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-11}$

Продовження таблиці

Сталь за ГОСТ 27772-88	Марка сталі	Значення коефіцієнта k , МПа ³ /год			
		Температура, °С			
		0...100	100...200	200...300	300 і більше
C275	ВСт3пс6-2	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-11}$
C285	ВСт3пс5-2, ВСт3Гпс5-2	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$6 \cdot 10^{-11}$
C345, C345T	09Г2	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	09Г2С, 14Г2 (листовий, фасонний прокат товщиною до 20 мм) 15ХСНД (листовий прокат товщиною до 10 мм, фасонний – до 20 мм)	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	12Г2С група 1	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	09Г2 група 1, 09Г2 група 2, 09Г2С група 1, 14Г2 група 1 (фасонний – до 20 мм)	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	390	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	ВСтТпс	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	C345К	10ХНДП	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$
C375, C375T	09Г2С група 2	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	12Г2С група 2	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	14Г2 група 1 (фасонний прокат товщиною більше 20 мм), 14Г2 група 2 (фасонний прокат товщиною до 20 мм)	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
	14Г2 (листовий, фасонний прокат товщиною більше 20 мм), 10Г2С1, 15ХСНД (фасонний прокат товщиною більше 20 мм, листовий – більше 10 мм), 10ХСНД (фасонний прокат без обмеження товщини, листовий – товщиною до 10 мм)	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-11}$
C390, C390T	14Г2АФ, 10Г2С1 термічно зміцнена, 10ХСНД (листовий прокат товщиною більше 10 мм)	$3 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-11}$
C390К	15Г2АФДпс	$3 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-11}$
C440	16Г2АФ, 18Г2АФпс, 15Г2СФ термічно зміцнена	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-11}$
C590	12Г2СМФ	$5 \cdot 10^{-15}$	$7 \cdot 10^{-15}$	$7 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-11}$
C590К	12ГН2МФАЮ	$5 \cdot 10^{-15}$	$7 \cdot 10^{-15}$	$7 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-11}$

Гранично допустимі деформації повзучості встановлюють з умови, щоб за цих деформацій певного елемента він зберігав свої експлуатаційні якості в заданих межах, тобто щоб у конструкції не виникало ознак руйнування і не змінювалась суттєво її форма. Вважають, що зазначена вимога задовольняється, якщо за гранично допустиму деформацію видовження від повзучості прийняти деформацію 0,2 %. Останнє означає, що конструктивний елемент,

наприклад стержень завдовжки 1 м, за час своєї служби подовжиться не більше як на 2 мм. Значимо, що ця розрахункова умова приводить до жорсткіших вимог відносно допускних деформацій повзучості, ніж у разі розрахунку за критичними напруженнями. Оцінку критичної напруги повзучості при заданому строку експлуатації конструкції або критичного часу за даної робочої напруги й у цьому разі можна зробити за формулою (15), приймаючи $\varepsilon_{кр} = \sigma_{кр} / E = 0.002$.

Засіб послідовного наближення розрахунку системи за деформованим станом може застосовуватись у такій послідовності:

1. Виконується звичайний розрахунок за деформованою схемою, з урахуванням викривлень, визначених під час обстеження, знаходять внутрішні зусилля та деформації M, N, Q, ε і визначають деформований стан першого наближення.

2. За деформованим станом першого наближення знаходять внутрішні сили та деформації першого наближення $M_1, N_1, Q_1, \varepsilon_1$ і визначають їхні прирости $\Delta M_1 = M_1 - M$, $\Delta N_1 = N_1 - N$, $\Delta Q_1 = Q_1 - Q$, $\Delta \varepsilon_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon$.

3. Виконується наступний розрахунок отриманої деформованої системи на приріст внутрішніх сил і деформації $\Delta M, \Delta N, \Delta Q, \Delta \varepsilon$ з урахуванням повзучості за формулою (11) після t часів експлуатації, визначаються додаткові переміщення до раніше знайдених і встановлюється деформований стан другого наближення.

4. За деформованим станом другого наближення знаходять внутрішні сили та деформації другого наближення $M_2, N_2, Q_2, \varepsilon_2$ і визначають їхні прирости $\Delta M_2 = M_2 - M_1$, $\Delta N_2 = N_2 - N_1$, $\Delta Q_2 = Q_2 - Q_1$, $\Delta \varepsilon_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$. Далі операція повторюється з третього пункту з урахуванням повзучості за інтервали часу Δt .

Модуль пружності стержня з вигином

При виконанні розрахунків ферм або рам з викривленими елементами необхідно задавати характеристики жорсткості стержням з урахуванням їх викривлення.

Диференціальне рівняння стиснуто-розтягнутого стержня має вигляд

$$y_1^n + \alpha^2 y_1 = -\frac{P \cdot f_0 \cdot \sin \frac{\pi \cdot z}{l}}{EI}, \quad (16)$$

де $\alpha^2 = \frac{P}{EI}$; $l = l_0 \mu$; y_1 – вигин стержня в довільній точці.

Виконавши перетворення, отримаємо жорсткість викривленого стержня

$$EI = \left(1 + f_0 / y_1 \left(\frac{l}{2} \right) \right) l^2 P / \pi^2, \quad (17)$$

де $y_1 \left(\frac{l}{2} \right)$ – вигин у середині стержня в навантаженому стані.

Залишковий ресурс елементів ферм, що експлуатуються і мають погнутості визначається за формулою

$$\tau_3 = \tau_e \frac{[f] - f_e}{f_e}, \quad (18)$$

де τ_3, τ_e – відповідно залишковий ресурс елемента ферми і час експлуатації ферми на момент обстеження і визначення прогину f_e , роки; $f_e, [f]$ – відповідно прогин елемента, накопичений за τ_e років експлуатації, й критично допустимий прогин елемента відповідно до [2].

Якщо в подальшому будуть змінені умови експлуатації ферми, то необхідно виконати розрахунки на режими навантажень, визначити зусилля в стержнях і вирахувати їхні прогини.

$$\text{Тоді } f_c = f_e + f,$$

де f – розрахункове значення прогину за формулою (18).

Тоді ресурс визначається за формулою

$$\tau_3 = \tau_e \frac{[f] - f_c}{f_c}, \text{ рік.} \quad (19)$$

П р и к л а д. Визначимо залишковий ресурс елемента ферми із конструкційної сталі С345, що має $\sigma_{кр} = 345$ МПа, модуль пружності $E = 2.06 \cdot 10^5$ МПа, нагрівається до температури 30 °С.

Із вищенаведеної таблиці для сталі С345 $n = 3$, $k = 5 \cdot 10^{-14}$.

Робоча напруга в елементі $\sigma = 100$ МПа. Якщо припустити, що ця напруга не змінюється протягом усього терміну експлуатації, то $\sigma_{c(кр)} = \sigma = 100$ МПа. Підставляючи ці значення у формулу (15), визначимо, скільки часу необхідно для втрати стійкості елемента внаслідок повзучості сталі.

$$t_{кр} = \sigma_{кр} / Ek \sigma^n = 345 / 2.06 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-14} \cdot 100^3 = 334951 \text{ год.}$$

В одному році 8766 год. Тоді $t_{кр} = 38,2$ років.

Якщо розглядати зміну в часі викривлення і, як наслідок, зміну $\sigma_{кр}(t)$, то задачу слід вирішувати в нелінійній постановці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. СНиП II-23-81* Стальные конструкции / Госстрой СССР. - М., 1990. - 96 с.
2. ДБН 362-92 Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації / Державний комітет України в справах архітектури, будівництва та охорони історичного середовища. – К., 1995. – 48 с.
3. Корнілов О.А. Опір матеріалів. – К.: Логос, 2002. – 562 с.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ МАШИННЫХ ЗАЛОВ АЭС

Т. И. Матченко, Л. Б. Шамис, Е. Т. Матченко, Л. Ф. Первушова

Представлена методика оценки остаточного ресурса элементов стальных ферм впоследствии деформаций ползучести.

Ключевые слова: ресурс, долговечность, методика.

ESTIMATION PROCEDURE OF THE RESIDUAL SERVICE LIFE OF THE STEEL TRUSSES IN THE MACHINE ROOMS OF NPP

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

Estimation procedure of the residual service life of the steel trusses afterwards creep deformations is proposed.

Keywords: resource, durability, methodology.

Надійшла до редакції 22.12.10