



АВТОР



МАТЧЕНКО Т.І.

Канд. техн. наук, провідний інженер ПАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект»

РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ЗНАХОДЯТЬСЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ, НА СТАТИЧНУ МІЦНІСТЬ І ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ

УДК 624.015:624.023:620.19

АНОТАЦІЯ

В даній статті наведено критерії для розрахунків на міцність та опір крихкому руйнуванню елементів сталевих конструкцій з тріщинами, що знаходяться в експлуатації, при центральному розтягу, при позацифровому розтягу і при згині.

This article describes the criteria for strength calculations and resistance to brittle fracture of steel structures with cracks in operation at central and eccentric tensile and flexural.

КЛЮЧОВІ СЛОВА

сталеві конструкції, крихке руйнування, розрахунок

У випадку прийняття рішення щодо перепризначення ресурсу сталевих конструкцій, що знаходяться в експлуатації і ресурс яких збігає, необхідно виконати розрахункове обґрунтування міцності і стійкості конструкцій з урахуванням накопичених пошкоджень за час їх експлуатації. При цьому розрахункове обґрунтування повинно задовольняти вимогам нормативних документів [1, 2]. У відповідності з п.1 [1] державні будівельні норми [1] встановлюють вимоги до проектування сталевих конструкцій, у тому числі при їх зведенні, реконструкції та ремонті, а також при визначенні придатності до експлуатації існуючих конструкцій, але в [1] при визначенні міцності і стійкості елементів конструкцій відсутні залежності параметрів як функцій часу експлуатації, не враховуються параметри пошкоджень та механізми деградації. В [2] в роз-

ділі «Розрахункова оцінка» наведено співвідношення для визначення несучої здатності і стійкості елементів конструкцій з урахуванням корозії, послаблень у вигляді вирізів, підрізів, зміни стрілки викривлення, розцентрування розкосів і таке інше. В [1, 2] не розглядається опір крихкому руйнуванню елементів сталевих конструкцій з тріщинами, вплив пошкодження вузлів з'єднання конструкцій на їх розрахункові характеристики.

Ціль цієї роботи - викласти співвідношення для оцінки статичної міцності, стійкості, опору крихкому руйнуванню, що не вступають в протиріччя зі співвідношеннями [1], але їх доповнюють.

Для зручності в подальшому використаний перелік розділів, формул, таблиць і рисунків в цій роботі співпадає з подібними в [1].

Критерії для розрахунку на статичну міцність та опір крихкому руйнуванню елементів сталевих конструкцій, що знаходяться в експлуатації, при центральному розтягу і стиску

8.1.1 Розрахунок на міцність елементів із сталі з нормативним опором $R_{ym}(1-\omega(t)_R) \leq 440 \text{ Н/мм}^2$ при центральному розтягу і стиску при перевірці на статичну міцність слід виконувати за формулою:

$$\frac{N(t)\gamma_n}{A_n(1-\omega(t)_A)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_C} \leq 1; \quad (8.1)$$

розрахунок на крихку міцність при центральному розтягу елементів сталевих конструкцій з тріщинами слід виконувати за формулою:

$$\frac{N(t)\gamma_n}{A_n(1-\omega(t)_A)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_C} \leq 1,$$

де γ_C - коефіцієнт умов роботи, що визначається у відповідності з таблицею 5.1 [1]. У випадку зростання значень R_y протягом експлуатації, приймаємо, що $\omega(t)$



$R = 0$; $N(t)$ - сила вздовж елемента на час t ; L - довжина тріщини в розтягнутому волокні елемента сталевій конструкції, м; $[K_{IC}]$ - критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень нормального відриву у відповідності з рис. 1, МПа \times (м)^{0,5}, приймаються за результатами випробувань зразків або за даними [3]; $\omega(t)_{KIC}$ - параметр пошкодження структури матеріалу у вигляді зменшення значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень нормального відриву, що змінюється в часі, визначаються у відповідності з [6], долі від одиниці; $\omega(t)_A$ - параметр пошкодження, відносно зменшення площі перерізу внаслідок корозії або абразивного зносу, визначаються у відповідності з [6], долі від одиниці; $\omega(t)_R$ - параметр пошкодження структури матеріалу у вигляді зростання (в такому разі приймаємо $\omega(t)_R = 0$), або зменшення його міцності, визначаються у відповідності з [6], що змінюється в часі, долі від одиниці.

Розрахунок на міцність розтягнутих елементів зі сталі з відношенням $R_U/\gamma_U \geq R_y$, експлуатація яких можлива і після досягнення металом межі текучості, а також елементів із сталі з нормативним опором $R_m(1-\omega(t)_R) \leq 440 \text{ Н/мм}^2$ слід виконувати за формулою (8.1) із заміною значення R_y на R_U/γ_U .

Розрахунок на міцність елементів у перерізі з нарізкою для гайки слід виконувати як розрахунок болта на розтяг; при цьому значення R_b слід обчислювати за табл. 7.4 [1] із заміною R_{bm} на R_m .

8.1.2 Розрахунок на міцність перерізу у місцях кріплення розтягнутих елементів, виконаних з одиночних кутиків, що приєднуються однією полицею болтами, слід виконувати за формулою (8.1) і за формулою

$$\frac{N(t)\gamma_n\gamma_u}{A_n(1-\omega(t)_A)R_u(1-\omega(t)_R)\gamma_{C1}} \leq 1, \quad (8.2)$$

де γ_{C1} - коефіцієнт умов роботи, що визначається згідно з додатком Е [1].

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню перерізу з тріщинами у місцях кріплення розтягнутих елементів, виконаних з одиночних кутиків, що приєднуються однією полицею болтами, слід виконувати за формулою

$$\frac{N(t)\gamma_n\gamma_u 1,12(\pi L)^{1/2}}{A_n(1-\omega(t)_A)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_{C1}} \leq 1.$$

8.1.3 Розрахунок на стійкість елементів суцільного перерізу при центральному стиску і при виконанні вимог п.п. 8.3.2 – 8.3.7 [1] слід виконувати за формулою

$$\frac{N(t)\gamma_n}{\varphi A_n(1-\omega(t)_A)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_C} \leq 1, \quad (8.3)$$

де φ - коефіцієнт стійкості при центральному стиску, значення якого при $\bar{\lambda} \geq 0,4$ необхідно обчислювати за формулою:

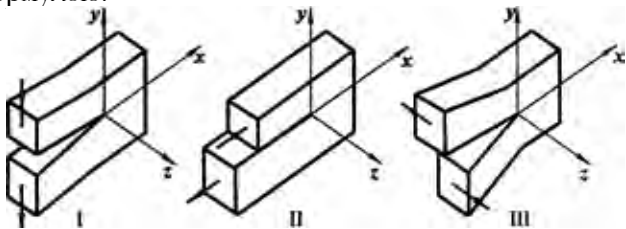


Рис.1. Різновиди переміщення берегів тріщин і відповідно різновиди руйнувань (I - нормального відриву, II - поздовжнього зсуву, III - поперечного зсуву).

$$\varphi = \frac{0,5}{\lambda^2} (\delta - \sqrt{\delta^2 - 39,48\lambda^2}). \quad (8.4)$$

Значення коефіцієнта δ у формулі (8.4) слід обчислювати за формулою:

$$\delta = 9,87(1 - \alpha + \beta \times \bar{\lambda}) + \bar{\lambda}^2, \quad (8.5)$$

де α і β - коефіцієнти, що характеризують початкові неправильності форми та залишкові напруження і визначаються за табл. 8.1 [1] залежно від типу поперечного перерізу стрижня та типу кривої стійкості; $\bar{\lambda}$ - умовна гнучкість стрижня, що визначається за формулою:

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{R_y(1-\omega(t)_R)}{E(1-\omega(t)_E)}}; \quad (8.5.1)$$

$$\lambda = l_{ef}/i, \quad (8.5.2)$$

де λ - гнучкість елемента; i - радіус інерції перерізу елемента, що визначається за формулою:

$$i = \sqrt{\frac{I(1-\omega(t)_I)}{A(1-\omega(t)_A)}}; \quad (8.5.3)$$

де A - площа перерізу елемента на початку експлуатації, м²; I - момент інерції перерізу на початку експлуатації, м⁴; $\omega(t)_E$ - параметр пошкодження, зменшення або збільшення модуля деформації матеріалу, долі від одиниці; $\omega(t)_I$ - параметр пошкодження, зменшення моменту інерції перерізу, долі від одиниці; l_{ef} - розрахункова довжина елемента, м.

13.3.1 Розрахункові довжини l_{ef} колон (стійок) постійного по довжині перерізу або окремих ділянок ступінчастих колон слід визначати за формулою:

$$\lambda = l_{ef}/i, \quad (13.2)$$

де l - геометрична довжина колони, окремої її ділянки або висота поверху; μ - коефіцієнт розрахункової довжини колони.

13.3.3 Коефіцієнти розрахункової довжини μ колон (стійок) постійного по довжині перерізу слід визначати залежно від умов закріплення їхніх кінців і виду навантаження. Для деяких випадків опорного закріплення і виду навантаження значення коефіцієнту μ наведено в табл.13.7.

Коефіцієнти розрахункової довжини колон (стійок) постійного по довжині перерізу з пружними закріпленнями кінців слід визначати за формулами, наведеними у табл. P2, P3.

8.1.5 Стиснуті елементи з суцільними стінками відкритого перерізу за рис.8.1[1] рекомендується укріплювати планками чи ґратками, при цьому повинні бути виконані вимоги п.п. 8.2.1 – 8.2.9 [1].

За відсутності планок чи ґраток такі елементи, окрім розрахунку за формулою (8.3) у головних площинах інерції $x-x$ і $y-y$, необхідно перевіряти на стійкість при згинально-крутильній формі втрати стійкості за формулою

$$\frac{N(t)\gamma_n}{\varphi_C A(1-\omega(t)_A)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_C} \leq 1, \quad (8.6)$$

де φ_C - визначається за п.8.1.5 [1] з урахуванням зміни



в часі відносної гнучкості за формулою (8.5.1).

Розрахунок елементів наскрізного перерізу елементів конструкцій, що знаходяться в експлуатації, виконується за вимогами п.8.2 [1] з урахуванням (8.5.2) і (8.5.3).

Перевірка місцевої стійкості стінок і поясних листів центральних стиснутих елементів суцільного перерізу, що знаходяться в експлуатації, виконується за вимогами п.8.3 [1] з урахуванням (8.5.1) - (8.5.3).

Розрахунок елементів сталевих конструкцій, що

знаходяться в експлуатації, при згині

Класифікація елементів, що згинаються, приймається у відповідності з [1].

9.2.1 Розрахунок на статичну міцність балок у розрахункових перерізах 1-го класу необхідно виконувати за формулами:

- при дії згинального моменту $m(t)$ в одній з головних площин:

$$\frac{\gamma_n M(t)}{W_{n,\min} (1 - \omega(t)_w) R_y (1 - \omega(t)_R) \gamma_C} \leq 1, \quad (9.1)$$

- при дії поперечної сили $Q(t)$ що спрямована паралельно серединній площині стінки:

$$\frac{\gamma_n Q(t) S(t) (1 - \omega(t)_S)}{I (1 - \omega(t)_I) t_w R_s (1 - \omega(t)_R) \gamma_C} \leq 1 \quad (9.2)$$

- при дії згинальних моментів $M_x(t)$ і $M_y(t)$ у двох головних площинах:

$$\frac{\gamma_n M_x(t) \times y}{I_{xI} (1 - \omega(t)_I) R_y (1 - \omega(t)_R) \gamma_C} \pm \frac{\gamma_n M_y(t) \times x}{I_{yI} (1 - \omega(t)_I) R_y (1 - \omega(t)_R) \gamma_C} \leq 1 \quad (9.3)$$

Таблиця 13.7 Коефіцієнти розрахункової довжини стійок

Схема опорного закріплення колон (стійок) і вид навантаження								
μ на початку експлуатації	1,0	0,7	0,5	2,0	1,0	2,0	0,725	1,12
$\mu(t)$ на час (t) експлуатації	1,0	$0,7 + 0,3 \omega$	$0,5 + 0,25 \omega$	$2 / (1 - \omega)$	$1 / (1 - \omega)$	2,0	0,725	$1,12 / (1 - \omega)$

Примітка: ω_n - параметр пошкодження затиснення нижнього вузла елемента, колони, стояка; ω_B - параметр пошкодження затиснення верхнього вузла елемента, долі від одиниці.

Таблиця Р.1 Розрахункова довжина елемента, розкріпленого в'язями в одній площині. (Доповнення до таблиці Р.1 Коефіцієнти розрахункової довжини елемента в площині в'язей (μ_{ef}) та з площини в'язей (μ_{ef1}) на час експлуатації (t) .)

Схема елемента в площині в'язей (а) та з площини в'язей (б)	Коефіцієнти розрахункової довжини елемента в площині в'язей (μ_{ef}) та з площини в'язей (μ_{ef1}) на час експлуатації (t) .
<p>а)</p>	$\mu_{ef}(t) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \omega_n,$ $\mu_1 = (0,36 + 0,59 \alpha^3)^{1/2},$ $\mu_2 = (0,83 + 0,17 \alpha^3)$
<p>б)</p>	$\mu_{ef1}(t) = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \omega_n,$ $\mu_1 = (0,6k^{1/2} + 0,54\beta) / k,$ $\mu_2 = [0,75 + 0,25(\beta/k - 1)]^{2k-3}$

Таблиця Р.2 Коефіцієнт розрахункової довжини μ колон (стояків) із пружним закріпленням. (Доповнення до таблиці Р.2 Коефіцієнти розрахункової довжини μ колон (стояків) із пружним закріпленням кінців на час експлуатації (t) .)

Схема колони	Коефіцієнт розрахункової довжини $\mu(t)$
	$\mu(t) = \sqrt{\frac{5,4(\alpha + 4) + \beta(0,25\alpha + 1,2)}{5,4(\alpha + 1) + \beta \times (\alpha + 2,4)}} + 0,25\omega$

Примітка 1. α і β - коефіцієнти, що обчислюються, як $\alpha = \frac{K_m l}{EI}$; $\beta = \frac{K_n l^3}{EI}$;

$\nu = \frac{K_m l}{K_m}$ - відношення коефіцієнтів жорсткості пружного закріплення опорних перерізів стійки;

де K_m - коефіцієнт жорсткості пружного закріплення, Н/см, що дорівнює значенню реактивного моменту, який виникає в опорному перерізі при його повороті на кут $\varphi = 1$; K_n - коефіцієнт жорсткості пружної опори, Н/см, що дорівнює значенню реактивної сили, яка виникає в опорному перерізі при його переміщенні на $\delta = 1$.

Примітка 2. Значення коефіцієнтів K_m і K_n для деяких рамних систем наведено в таблиці Р.3.

де x і y - відстані від головних осей інерції до розглядуваної точки перерізу;

- у загальному випадку

$$\frac{0,87(\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2}}{R_y (1 - \omega(t)_R) \gamma_C} \leq 1 \quad (9.4)$$

де $\sigma_x = M(t) \times y / [I_{xI} (1 - \omega(t)_I)]$ - нормальні напруження у серединній площині стінки, спрямовані паралельно до поздовжньої осі балки; $M(t)$ - згинаючий момент на час t ; $Q(t)$ - поперечна сила (сила зсуву) на час t ; σ_y - те ж саме, спрямовані перпендикулярно до поздовжньої осі балки, у тому числі σ_{loc} , що обчислюються за формулою (9.7) [1];

$\tau_{xy} = Q(t) S_x (1 - \omega(t)_I) \times [I_{xI} (1 - \omega(t)_I) t_w]$ - дотичні напруження у розглядуваній точці стінки балки.

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню балок з тріщинами в розтягнутому волокні у розрахункових перерізах 1-го класу необхідно виконувати за формулами:

- при дії згинального моменту $M(t)$ в одній з головних площин

$$\frac{\gamma_n M(t) 1,12(\pi L)^{1/2}}{W_{n,\min} (1 - \omega(t)_w) [K_{IC} (1 - \omega(t)_{IC}) \gamma_C]} \leq 1;$$

- при дії поперечної сили $Q(t)$, що спрямована паралельно серединній площині стінки з тріщинами:



$$\frac{\gamma_n Q(t) S (1 - \omega(t)_s) 1,12(\pi L)^{1/2}}{I (1 - \omega(t)_I) I_w [K_{шс}] (1 - \omega(t)_{кшс}) \gamma_c} \leq 1 ;$$

- при дії згинальних моментів $M_x(t)$ і $M_y(t)$ у двох головних площинах:

$$\frac{\gamma_n M_x(t) \times y \times 1,12(\pi L)^{1/2}}{I_{xn} \times (1 - \omega(t)_I) \times [K_{шс}] \times (1 - \omega(t)_{кшс}) \times \gamma_c} \pm \frac{\gamma_n M_y(t) \times x \times 1,12(\pi L)^{1/2}}{I_{yn} (1 - \omega(t)_I) [K_{шс}] (1 - \omega(t)_{кшс}) \gamma_c} \leq 1,$$

де x і y – відстані від головних осей інерції до розглядуваної точки перерізу; $\omega(t)_s$ – параметр пошкодження, зменшення статичного моменту опору перерізу, долі від одиниці; $\omega(t)_{кшс}$ – параметр пошкодження структури матеріалу у вигляді зменшення значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень поздовжнього зсуву, що змінюється в часі, долі від одиниці; $[K_{шс}]$ – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень поздовжнього зсуву відриву у відповідності з рис. 1, МПа \times (м)^{0,5}, приймаються за результатами випробувань зразків або за даними [3]; $\omega(t)_w$ – параметр пошкодження, зменшення моменту опору перерізу, долі від одиниці.

9.2.3 Розрахунок на статичну міцність розрізних балок 2-го і 3-го класів двотаврового і коробчастого перерізу, виконаних зі сталі з нормативним опором $R_{шн}(1-\omega(t)_R) \leq 440 \text{ Н/мм}^2$ при значеннях дотичних напружень $\tau_y = Q_y(t)/(A_w(1-\omega(t)_A)) \leq 0,9R_s(1-\omega(t)_r)$ (окрім опорних перерізів) слід виконувати за формулами:

- при згині у площині найбільшої жорсткості ($I_x > I_y$):

$$\frac{\gamma_n M_x(t)}{C_x \beta W_{xn, \min} (1 - \omega(t)_w) R_y (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1; \quad (9.10)$$

- при згині у двох головних площинах і значеннях дотичних напружень $\tau_x = Q_x(t)/(2A_f(1-\omega(t)_A)) \leq 0,5R_s(1-\omega(t)_R)$ (окрім опорних перерізів):

$$\frac{\gamma_n M_x(t)}{C_x \beta W_{xn, \min} (1 - \omega(t)_w) R_y (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \pm \frac{\gamma_n M_y(t)}{C_y \beta W_{yn, \min} (1 - \omega(t)_w) R_y (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1, \quad (9.11)$$

де $M_x(t)$ і $M_y(t)$ – абсолютні значення згинальних моментів у розрахунковому перерізі елемента; $Q_y(t)$ і $Q_x(t)$ – відповідні абсолютні значення поперечних сил; β – коефіцієнт, що приймається у відповідності з п. 9.2.3 [1].

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню розрізних балок 2-го і 3-го класів двотаврового і коробчастого перерізу, виконаних зі сталі з нормативним опором $R_{шн}(1-\omega(t)_R) \leq 440 \text{ Н/мм}^2$ при значеннях дотичних напружень $\tau_y = Q_y(t)/(A_w(1-\omega(t)_A)) \leq 0,9R_s(1-\omega(t)_R)$ (окрім опорних перерізів) слід виконувати за формулами:

- при згині у площині найбільшої жорсткості ($I_x > I_y$):

$$\frac{\gamma_n M_x(t) 1,12(\pi L)^{1/2}}{C_x \beta W_{xn, \min} (1 - \omega(t)_w) [K_{шс}] (1 - \omega(t)_{кшс}) \gamma_c} \leq 1 ;$$

- при згині у двох головних площинах і значеннях дотичних напружень $\tau_x = Q_x(t)/(2A_f(1-$

$\omega(t)_A) \leq 0,5R_s(1-\omega(t)_R)$ (окрім опорних перерізів):

$$\frac{\gamma_n M_x(t) 1,12(\pi \times L)^{1/2}}{C_x \beta W_{xn, \min} (1 - \omega(t)_w) [K_{шс}] (1 - \omega(t)_{кшс}) \gamma_c} \pm \frac{\gamma_n M_y(t) 1,12(\pi L)^{1/2}}{C_y \beta W_{yn, \min} (1 - \omega(t)_w) [K_{шс}] (1 - \omega(t)_{кшс}) \gamma_c} \leq 1$$

Розрахунок на статичну міцність в опорному перерізі балок (при $M_x(t)=0$ і $M_y(t)=0$) слід виконувати за формулами:

$$\frac{\gamma_n Q_y(t)}{A_w (1 - \omega(t)_A) R_s (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\gamma_n Q_x(t)}{2A_f (1 - \omega(t)_A) R_s (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1 \quad (9.14)$$

Розрахунок на опір крихкому руйнуванню в опорному перерізі балок з тріщинами (при $M_x(t)=0$ і $M_y(t)=0$) слід виконувати за формулами:

$$\frac{\gamma_n Q_y(t) 1,12(\pi L)^{1/2}}{A_w (1 - \omega(t)_A) [K_{шс}] (1 - \omega(t)_{кшс}) \gamma_c} \leq 1$$

$$\frac{\gamma_n Q_x(t) 1,12(\pi L)^{1/2}}{2A_f (1 - \omega(t)_A) [K_{шс}] (1 - \omega(t)_{кшс}) \gamma_c} \leq 1$$

У разі послаблення стінки отворами для болтів ліву частину формули (9.14), а також значення дотичних напружень τ слід помножити на коефіцієнт α , що визначається за формулою (9.5).

9.2.8 Розрахунок на міцність бісталевих розрізних балок двотаврового і коробчастого перерізів з двома осями симетрії при значеннях дотичних напружень $\tau_y = Q_y(t)/(A_w(1-\omega(t)_A)) \leq 0,9R_s(1-\omega(t)_R)$ (окрім опорних перерізів) необхідно виконувати як розрахунок перерізів 2-го класу за формулами:

- при згині в площині найбільшої жорсткості ($I_x > I_y$):

$$\frac{\gamma_n M_x(t)}{C_{xr} \beta_r W_{xn} (1 - \omega(t)_w) R_{yw} (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1 ; \quad (9.18)$$

- при згині у двох головних площинах:

$$\frac{\gamma_n M_x(t)}{C_{xr} \beta_r W_{xn} (1 - \omega(t)_w) R_{yw} (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \pm \frac{\gamma_n M_y(t)}{C_{yr} W_{yn} (1 - \omega(t)_w) R_{yf} (1 - \omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1. \quad (9.19)$$

У формулах (9.18) і (9.19) позначено:

$$c_{xr} = \frac{\alpha_f \times r + 0,25 - 0,0833/r^2}{\alpha_f + 0,167} , \quad (9.20)$$

де $\alpha_f = A_f/A_w$, $r = R_{yf}/R_{yw}$; β – коефіцієнт, що приймається у відповідності з п. 9.2.8 [1].

Розрахунок на міцність балок суцільного перерізу для кранових колій, що знаходяться в експлуатації

9.3.3 Міцність стиснутої зони стінок балок кранових колій, що розраховуються на утомленість, для кранів груп режимів роботи 7К (у цехах металургійних виробництв) і 8К за ГОСТ 25546, виконаних зі сталі з межею текучості до 440Н/мм², слід виконувати за формулами:



$$\frac{\gamma_n \beta_k}{R_y(1-\omega(t)_R)} \sqrt{(\sigma_x + \sigma_{loc,x})^2 - (\sigma_x + \sigma_{loc,x})\sigma_{loc,y} + \sigma_{loc,y}^2 + 3(\tau_{xy} + \tau_{loc,xy})^2} \leq 1; \quad (9.22)$$

$$\frac{\gamma_n}{R_y(1-\omega(t)_R)} (\sigma_x + \sigma_{loc,x}) \leq 1; \quad (9.23)$$

$$\frac{\gamma_n}{R_y(1-\omega(t)_R)} (\sigma_{fy} + \sigma_{loc,y}) \leq 1; \quad (9.24)$$

$$\frac{\gamma_n}{R_y(1-\omega(t)_R)} (\tau_{xy} + \tau_{loc,xy} + \tau_{f,xy}) \leq 1; \quad (9.25)$$

де умовні позначення такі самі, як в [1].

Розрахунок на згинальну стійкість елементів суцільного перерізу, що згинаються.

9.4.1 Розрахунок на загальну стійкість двотаврових балок 1-го класу, а також бісталевих балок 2-го класу при виконанні вимог п. 9.2.1 і п. 9.2.8 необхідно виконувати за формулами:

- при згині у площині стінки, що збігається з площиною симетрії перерізу

$$\frac{\gamma_n M_x(t)}{\varphi_b W_{CX} (1-\omega(t)_W) R_y (1-\omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1; \quad (9.28)$$

- при згині у двох головних площинах:

$$\begin{aligned} & \frac{\gamma_n M_x(t)}{\varphi_b W_{CX} (1-\omega(t)_W) R_y (1-\omega(t)_R) \gamma_c} \pm \\ & \pm \frac{\gamma_n M_y(t)}{W_y (1-\omega(t)_W) R_y (1-\omega(t)_R) \gamma_c} \leq 1. \end{aligned} \quad (9.29)$$

Перевірка місцевої стійкості стінок і поясних листів елементів суцільного перерізу, що згинаються

9.5.1 Місцеву стійкість стінок балок 1-го класу слід вважати забезпеченою, якщо виконані вимоги п.п. 9.5.1, 9.5.3 – 9.5.5, 9.4.1 – 9.4.5 і умовна гнучкість стінки

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_d}{t_w} \sqrt{\frac{R_y (1-\omega(t)_R)}{E/(1-\omega(t)_E)}}$$

не перевищує значень: 3,5 – за відсутності місцевого напруження у балках з двосторонніми поясними швами; 3,2 – те саме, у балках з односторонніми поясними швами; 2,5 – за наявності місцевого напруження у балках з двосторонніми поясними швами. При цьому необхідно влаштовувати основні поперечні ребра жорсткості та опорні ребра відповідно до вимог п.п. 9.5.9, 9.5.11 і 9.5.13.

9.5.3 Місцеву стійкість стінок балок 1-го класу симетричного перерізу, укріплених лише основними поперечними ребрами жорсткості, при значеннях умовної гнучкості стінки $\bar{\lambda}_w = 6\sqrt{R_y(1-\omega(t)_R)}/\sigma$ слід вважати забезпеченою, якщо виконана умова

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_c} \sqrt{(\sigma/\sigma_{cr} + \sigma_{loc}/\sigma_{loc,cr})^2 + (\tau/\tau_{cr})^2} \leq 1, \quad (9.39)$$

де σ , σ_{loc} , τ – складові напруженого стану, що визначаються відповідно до п. 9.5.2; σ_{cr} – критичне нормальне напруження, що обчислюється за формулою:

$$\sigma_{cr} = \frac{c_{cr} R_y (1-\omega(t)_R)}{\bar{\lambda}_w^2}, \quad (9.40)$$

де c_{cr} – коефіцієнт, що визначається згідно з п.п. 9.5.4 – 9.5.6; $\sigma_{loc,cr}$ – критичне місцеве нормальне напруження, що обчислюється за формулою:

$$\sigma_{loc,cr} = \frac{c_1 c_2 R_y (1-\omega(t)_R)}{\bar{\lambda}_w^2}, \quad (9.41)$$

де c_1 і c_2 – коефіцієнти, що визначаються згідно з п. 9.5.5; τ_{cr} – критичне дотичне напруження, що обчислюється за формулою:

$$\tau_{cr} = 10,3(1 + \frac{0,76}{\mu^2}) \frac{R_s(1-\omega(t)_R)}{\bar{\lambda}_d^2}, \quad (9.42)$$

де μ – відношення більшої сторони відсіку стінки до меншої; $\bar{\lambda}_d^2$ – умовна гнучкість стінки

$$\bar{\lambda}_d^2 = \frac{d_g}{t_w} \sqrt{\frac{R_y(1-\omega(t)_R)}{E/(1-\omega(t)_E)}}.$$

тут d_g – менша сторона відсіку стінки (h_{ef} або a).

Розрахунок елементів сталевих конструкцій на дію поздовжньої сили та згинального моменту

Розрахунок на статичну міцність

10.1.1 Розрахунок на статичну міцність позацентрово стиснутих (стиснуто-зігнутих) і позацентрово розтягнутих (розтягнуто-зігнутих) елементів, виконаних із сталі з нормативним опором $R_{yn}(1-\omega(t)_R) \leq 440$ Н/мм², що не підлягають безпосередній дії динамічних навантажень, при значеннях напружень $\tau \leq 0, 1R_y(1-\omega(t)_R)$ і $\tau = N(t)/(A_n(1-\omega(t)_A)) \leq 0, 1R_y(1-\omega(t)_R)$ слід виконувати за формулою

$$\begin{aligned} & \left(\frac{N(t)\gamma_n}{A_n(1-\omega(t)_A)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \right)^n + \\ & \frac{M(t)_x\gamma_n}{c_x W_{xn,min}(1-\omega(t)_W)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_c} + \\ & \frac{M(t)_y\gamma_n}{c_y W_{yn,min}(1-\omega(t)_W)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \leq 1 \end{aligned} \quad (10.1)$$

де $N(t)$, $M_x(t)$, і $M_y(t)$ – абсолютні значення відповідно поздовжньої сили і згинальних моментів при найбільш несприятливій комбінації розрахункових навантажень на час експлуатації (t); n , c_x , c_y – коефіцієнти, що приймаються згідно з таблицею МІ;

$W_{xn,min}$ – мінімальне з двох значень моментів опору поперечного перерізу елемента нетто відносно осі x-x, на початку експлуатації обчислених відповідно для розтягнутого та стиснутого волокна; $W_{yn,min}$ – теж, відносно осі y-y.

Якщо $\sigma = N(t)/(A_n(1-\omega(t)_A)) \leq 0, 1R_y(1-\omega(t)_R)$, формулу (10.1) слід застосовувати у разі виконання вимог п.п. 9.5.8 і 9.5.14.

Розрахунок на крихку міцність

Розрахунок на крихку міцність позацентрово розтягнутих (розтягнуто-зігнутих) елементів з тріщинами, виконаних із сталі з нормативним опором $R_{yn}(1-\omega(t)_R) \leq 440$ Н/мм², що не підлягають безпосередній дії динамічних навантажень, при значеннях напружень $\tau \leq 0, 5R_s(1-\omega(t)_R)$ і $\sigma = N(t)/(A_n(1-\omega(t)_A)) \leq 0, 1R_y(1-\omega(t)_R)$, слід виконувати за формулою:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{N(t)\gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2}}{A_n(1-\omega(t)_A)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} \right)^n + \\ & \frac{M(t)_x\gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2}}{c_x W_{xn,min}(1-\omega(t)_W)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} + \\ & \frac{M(t)_y\gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2}}{c_y W_{yn,min}(1-\omega(t)_W)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} \leq 1 \end{aligned}$$



Розрахунок на опір крихкому руйнуванню елементів з труб з тріщинами, що відповідають вимогам п. 10.1.1, слід виконувати за формулою:

$$\left(\frac{N(t)\gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2}}{A_n(1-\omega(t)_A)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} \right)^{3/2} + \frac{\sqrt{M(t)_y^2 + M(t)_x^2} \gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2}}{1,26W_{n,\min}(1-\omega(t)_W)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} \leq 1$$

де $W_{n,\min}$ – момент опору поперечного перерізу на початку експлуатації, обчислений для найнебезпечнішої точки перерізу.

Розрахунок на крихку міцність позацентрово розтягнутих (розтягнуто-зігнутих) елементів з тріщинами, виконаних із сталі з нормативним опором $R_{yt}(1-\omega(t)_R) \leq 440 \text{ Н/мм}^2$, що підлягають безпосередній дії динамічних навантажень, при значеннях напружень $\sigma \leq 0,5R_{yt}(1-\omega(t)_R)$ і $\sigma = N(t)/(A_n(1-\omega(t)_A)) \leq 0,1R_{yt}(1-\omega(t)_R)$, слід виконувати за формулою:

$$\frac{N(t)\gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2}}{A_n(1-\omega(t)_A)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} \pm \frac{M(t)_x \gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2} \times y}{I_{xn}(1-\omega(t)_I)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} \pm \frac{M(t)_y \gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2} \times x}{I_{yn}(1-\omega(t)_I)[K_{IC}](1-\omega(t)_{KIC})\gamma_c} \leq 1$$

де x, y – відстані від головних осей до розглядуваної точки перерізу.

Розрахунок на міцність елементів у випадках, що не передбачені розрахунком за формулою (10.1), слід виконувати за формулою

$$\frac{N(t)\gamma_n}{A_n(1-\omega(t)_A)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \pm \frac{M(t)_x \gamma_n \times y}{I_{xn}(1-\omega(t)_W)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \pm \frac{M(t)_y \gamma_n \times x}{I_{yn,\min}(1-\omega(t)_W)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \leq 1$$

10.1.2 Розрахунок на міцність позацентрово стиснутих елементів виконувати не потрібно при значенні приведенного відносного ексцентриситету $m_{ef} \leq 20$ за відсутності послаблення розрахункового перерізу та однакових значеннях згинальних моментів, що приймаються в розрахунок на міцність і стійкість.

10.1.3 Позацентрово стиснуті елементи, виконані зі сталі з нормативним опором $R_{yt}(1-\omega(t)_R) \leq 440 \text{ Н/мм}^2$, що мають несиметричні перерізи відносно осі, перпендикулярної до площини згину $x-x$ або $y-y$ (наприклад, перерізи типу 8, 10, а, 12, а і 13 за табл. К.2 додатка К), слід перевіряти на міцність у площині дії моменту за значеннями нормальних напружень у розтягнутому волокні за формулою

$$\left| \frac{N(t)\gamma_{m1}\gamma_n}{A_n(1-\omega(t)_A)R_U(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \right| + \left| \frac{N(t)\gamma_{m1}\gamma_n}{\delta W_m(1-\omega(t)_W)R_U(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \right| \leq 1, \quad (10.4)$$

де W_m – момент опору перерізу нетто на початку експлуатації, обчислений для розтягнутого волокна; δ – коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$\delta = 1 - 0,1 \frac{N(t)\gamma_n \lambda^2}{A(1-\omega(t)_A)R_y(1-\omega(t)_R)\gamma_c} \quad (10.5)$$

Розрахунок зварних, фрикційних, болтових з'єднань, що знаходяться в експлуатації, на статичну міцність та на опір крихкому руйнуванню виконується у відповідності з [3-5].

Приклад розрахунку на опір крихкому руйнуванню.

Металеві конструкції, що тривалий час експлуатуються в агресивних середовищах можуть накопичувати пошкодження у вигляді: корозійних вражень; викривлень елементів; старіння і втоми металу; утворення тріщин внаслідок їх циклічного зростання та інші. Приклад таких пошкоджень показаний на рис. 2.



Рис.2. Корозійні пошкодження та викривлення елементів в колоні, що знаходиться в експлуатації.

Втрата стійкості стиснутих розкосів, як правило, супроводжується виникненням тріщин в розтягнутих елементах. Однак розкриття тріщин вимірюється долями міліметрів і під шаром корозії незброєним оком їх побачити складно. У випадку вилучення зразка з розтягнутого елемента, шліфування його поверхні, під мікроскопом можна побачити тріщини, як показано на рис. 3.

Визначимо запаси стійкості до крихкого руйнування центрально розтягнутого сталевого розкоса в колоні. Розкос з кутика має тріщини (див. Рисунок 4).

Перевірка виконується для перерізу з найменшою площею, який проходить по найдовшій тріщині. Куттик має номер 7,5 клас сталі С 245. Розрахункове навантаження на куттик становить $N(t) = 0,14 \text{ МН}$.

Запас крихкої міцності (n) визначаємо за формулою

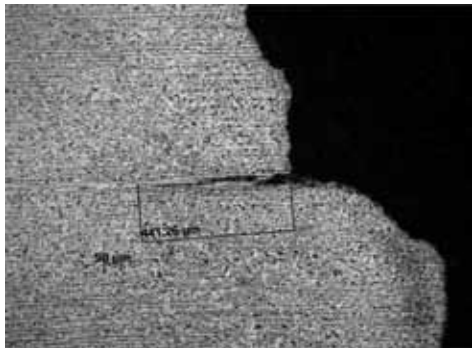


Рис.3. Смугаста структура сталі в зоні утворення тріщини.



Рис.4. Сталевий кутик з тріщинами.

(після формули 8.1) для декількох довжин тріщин (L) в кутику.

$$\frac{1}{n} = \frac{N(t)\gamma_n 1,12(\pi L)^{1/2}}{A_n(1-\omega(t)_A)[K_{IC}(1-\omega(t)_{KIC})]\gamma_c} \leq 1.$$

Результати розрахунків приведені в таблиці 1. В нашому випадку $\gamma_n=1,25$ – для класу наслідків СС3; $\gamma_c=1,05$ за таблицею 5.1 [1]; $A_n=7,39 \text{ см}^2=0,000739 \text{ м}^2$; $K_{IC}=103 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ за [3]; $[K_{IC}] = K_{IC}/1,2=85,8 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; параметр $\omega(t)_A$ зростає з довжиною тріщини, тому що зменшується залишковий переріз; прийmemo $\omega(t)_{KIC}=0$.

Таблиця 1 Результати розрахунків запасу крихкої міцності кутика з тріщиною

L, мм	10	20	30	40
$\omega(t)_A$	0,07	0,133	0,2	0,27
n	1,938	1,277	0,96	0,76

З таблиці 1 видно, що при центральному розтягу кутика номером 7,5 зі сталі класу С 245 силою 0,14 МН при довжині тріщини ~ 30 мм відбудеться крихке руйнування. У випадку відсутності тріщини перевірку міцності необхідно виконувати за формулою (8.1). При $R_y=240 \text{ МПа}$ запас міцності становить $n=1,065$.

ВИСНОВКИ

Отримані співвідношення для розрахунків на міцність та опір крихкому руйнуванню металевих конструкцій які мають тріщини, або в матеріалі яких відбулися процеси старіння, що працюють в умовах зсуву, згинаючого моменту, поздовжньої сили.

Отримані співвідношення можуть бути застосовані при визначенні придатності до експлуатації існуючих конструкцій та для актуалізації ДБН В.2.6-198.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сталеві конструкції, Норми проектування: ДБН В.2.6-198:2014. – [Чинні від 2015-01-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2014. - V, 199 с. – (Будівельні норми України).

2. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації: ДБН В 362-92. – [Чинні від 1992-07-01]. – К.: Держбуд України, 1995. – 47 с. – (Будівельні норми України).

3. Матченко Т.І. Розрахунок зварних елементів сталевих конструкцій на витривалість і циклічну тріщиностійкість / Матченко Т.І., Шаміс Л.Б., Матченко П.Т. // Будівництво України. – 2015. - № 1. - С. 37 - 44.

4. Матченко Т.І. Методика розрахунку довговічності фрикційних з'єднань сталевих конструкцій / Матченко Т.І., Шаміс Л.Б., Матченко П.Т. // Будівництво України. – 2015. - № 2-3. - С. 44 - 51.

5. Шаміс Л.Б. Розрахунок болтових з'єднань на циклічну тріщиностійкість і крихку міцність / Шаміс Л.Б. // Будівництво України, 2016. - №1. - С. 27-34.

6. Шаміс Л.Б. Методика визначення залишкового ресурсу облицювання сховища відпрацьованого ядерного палива за результатами випробувань зразків / Шаміс Л.Б., Матченко Т.І., Пervushova Л.Ф. // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - Вип.14. - Чорнобиль, 2010. - С. 69-77.

REFERENCES

1. Steelstructures. Design norms: DBN V.2.6-198:2014. – [Valid from 2015-01-01]. – К.: Minregionbud of Ukraine, 2014. - V, 199 p. – (State Building Norms, in Ukrainian).

2. Evaluation of the technical condition of steel constructions of industrial buildings and structures in use: DBN B 362-92. – [Valid from 1992-07-01]. - К.: Derzbud of Ukraine, 1995. - 47 p. – (State Building Norms, in Ukrainian).

3. Matchenko T.I., Shamis L.B., Pervushova L.F. Rozrahunok zvarnuh elementiv stalevuh konstruktzij na vutruvalist i tziklichny trishunostijkist [Calculation of welded steel structure on longevity and cyclic endurance fracture] // Construction of Ukraine. - 2015. - №1. - P. 37 - 44. – (In Ukrainian).

4. Matchenko T.I., Shamis L.B., Pervushova L.F. Metoduka rozrahunku dovgovichnosti fruktzijnuh zednan stalevuh konstruktzij [Methods of calculating the durability of friction connections of steel structures] // Construction of Ukraine. - 2015. - № 2 - 3. - P. 44-51. – (In Ukrainian).

5. Shamis L.B. Calculation bolting joints on the brittle fracture resistance // Budivnytstvo Ukrainy [Construction of Ukraine]. - 2016. - №1. - P. 27-34 (Ua).

6. Shamis L.B., Matchenko T.I., Pervushova L.F. Methods of determining the residual life of the lining storage of spent nuclear fuel on the results of the test samples // Problemy bezpeky atomnyh electrostantsiy i Chornobylya [Problems of nuclear power plants and of Chornobyl]. – 2010. – Iss.14. – P. 69 – 77 (Ua).