

Выводы

1. Оценка технического состояния является частью более общей проблемы управления надежностью высотных сооружений на стадиях расчета, проектирования, изготовления, строительства и обслуживания в рамках единой модели.
2. Для обеспечения эффективности процедуры оценки технического состояния необходимо решать вопросы достоверности результатов, экономической эффективности процесса обслуживания, выполнения технологических функций с заданной надежностью.

Литература

- [1] ДБН 362–92 Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації / Держбуд України. – К.: Укранхбудінформ, 1995.
- [2] Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд / Держкомітет будівництва, архітектури та житлової політики України. – Київ, 1997.
- [3] Руководство по эксплуатации промышленных дымовых и вентиляционных труб / Российский комитет по металлургии – М., 1993.
- [4] *Губанов В.В.* Инструкции по эксплуатации металлических дымовых труб // Вестник ДонГАСА, Вып. 2003–2 (39), т. 1. – С. 126–130.

Надійшла до редколегії 19.07.2008 р.

УДК 624.023.93

Оцінка технічного стану сталевих балок із дефектами на основі теорії ризиків

Пічугін С.Ф., д.т.н., Семко О.В., д.т.н., Семко В.О., к.т.н.

Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка,
Україна

Анотація. Розглядається питання оцінки технічного стану сталевих балок із дефектами. Наведені коефіцієнти умов роботи для врахування додаткових напружень від дефектів у вигляді однобічних вирізів у полиці, а також від загального горизонтального вигину балки.

Аннотация. Рассматривается вопрос оценки технического состояния стальных балок с дефектами. Приведены коэффициенты условий работы для учета дополнительных напряжений от дефектов в виде односторонних вырезов в полке, а также от общего горизонтального изгиба балки.

Abstract. The article deals with the problem concerning assessment technical condition of faulty steel beams. Operation condition factors are presented in order to take into account additional stresses caused by defects in the form of single-sided notches in the flange, as well as by total horizontal bending of the beam.

Ключові слова: сталеві балки, дефекти, технічний стан, ризики.

Теорія ризиків набуває все ширшого застосування для аналізу надійності будівельних конструкцій [1, 2, 3], особливо з чисто економічною відповідальністю, тобто без врахування імовірності людських жертв.

Розглядаються сталеві балки з дефектами, для яких розроблена інженерна методика розрахунку на основі досліджень [4, 5]. Для цього в формулу перевірки міцності введемо коефіцієнт умов роботи $\gamma_c = \gamma'_c \cdot \gamma''_c$. Цей коефіцієнт буде враховувати складову напружень кручення при постійному рівні надійності. Таким чином, умова міцності буде мати наступний вид

$$\frac{M}{W_g} \leq R_y \cdot \gamma'_c \cdot \gamma''_c, \quad (1)$$

де W_g – мінімальний момент опору пошкодженого вирізом перерізу сталеві балки; γ'_c – коефіцієнт умов роботи, який для дефекту у вигляді однобічного вирізу в полиці визначається за формулою (2); γ''_c – коефіцієнт умов роботи, що залежить від параметру економічних втрат.

$$\gamma'_c = \frac{\sigma_{згин}}{\sigma_{згин} + k_\ell \cdot \sigma_\sigma}, \quad (2)$$

$\sigma_{згин}$ – напруження, які виникають від дії згинального моменту; σ_{ω} – напруження, які виникають від кручення перерізу; k_{ℓ} – коефіцієнт, який характеризує ступінь розвитку напружень кручення в пошкодженій балці.

$$k_{\ell} = 0,12 \cdot \ln\left(\frac{\ell_e}{\ell}\right) + 1, \quad (3)$$

де ℓ_e – довжина вирізу; ℓ – прогін балки; b_e – глибина вирізу.

Розкриємо вираз (2) для випадку зосередженої сили

$$\begin{aligned} \sigma_{згин} &= \frac{M}{W_e}; & \sigma_{\omega} &= -E \cdot \frac{F \cdot e \cdot k}{GI_k} \cdot \frac{sh^2\left(k \frac{\ell}{2}\right)}{sh(k\ell)} \cdot \omega, \\ F &= \frac{4M}{\ell}; & \frac{E}{G} &\approx 2,5; & A &= \frac{e \cdot k}{I_k} \cdot \omega, \\ \gamma'_c &= \frac{\frac{M}{W_e}}{\frac{M}{W_e} + 10 \cdot k_{\ell} \cdot \frac{A \cdot M}{\ell} \cdot \frac{sh^2\left(k \frac{\ell}{2}\right)}{sh(k\ell)}}, \end{aligned} \quad (4)$$

де ω – секторіальна площа в місці визначення напружень; $sh(\dots)$ – гіперболічний синус; $k = \sqrt{\frac{GI_k}{EI_{\sigma}}}$ – згинно-крутильна характеристика балки; I_k, I_{σ} – момент інерції при вільному крученні та секторіальний момент інерції відповідно; e – ексцентриситет прикладання зовнішнього навантаження (відстань від центра кручення до осі $y-y$ непошкодженого перерізу балки).

Помножимо всі складові правої частини виразу (4) на $\frac{W_e}{M} \cdot \ell \cdot sh(k\ell)$:

$$\gamma'_c = \frac{\ell \cdot sh(k\ell)}{\ell \cdot sh(k\ell) + 10 \cdot k_{\ell} \cdot A \cdot W_e \cdot sh^2\left(k \frac{\ell}{2}\right)}.$$

Запишемо $B = AW_B$, тоді:

$$\gamma'_c = \frac{\ell \cdot sh(k\ell)}{\ell \cdot sh(k\ell) + 10 \cdot k_{\ell} \cdot B \cdot sh^2\left(k \frac{\ell}{2}\right)}. \quad (5)$$

Як видно, коефіцієнт умов роботи γ'_c не залежить від величини навантаження, а залежить лише від геометрії дефекту, перерізу та прогону сталеві балки.

Згідно з формулою (5) були підраховані коефіцієнти γ'_c для п'яти типів прокатних перерізів сталевих двотаврових балок (табл. 1÷5).

Таблиця 1

**Коефіцієнт умов роботи γ'_c для прокатного двотавра № 10
(прогін 3–9 м)**

b_v/b ℓ_v/ℓ	0,1	0,2	0,3	0,4
0,1	0,936	0,874	0,842	0,835
0,3	0,926	0,854	0,818	0,810
0,5	0,921	0,845	0,808	0,800
0,8	0,916	0,837	0,798	0,790
1,0	0,914	0,833	0,794	0,785

Таблиця 2

**Коефіцієнт умов роботи γ'_c для прокатного двотавра № 12
(прогін 3–9 м)**

b_v/b ℓ_v/ℓ	0,1	0,2	0,3	0,4
0,1	0,937	0,876	0,847	0,839
0,3	0,926	0,856	0,824	0,816
0,5	0,921	0,848	0,813	0,805
0,8	0,917	0,840	0,804	0,795
1,0	0,914	0,836	0,800	0,791

Таблиця 3

**Коефіцієнт умов роботи γ'_c для прокатного двотавра № 16
(прогін 3–9 м)**

b_v/b ℓ_v/ℓ	0,1	0,2	0,3	0,4
0,1	0,944	0,890	0,866	0,857
0,3	0,935	0,873	0,846	0,836
0,5	0,930	0,865	0,836	0,826
0,8	0,926	0,858	0,828	0,817
1,0	0,925	0,854	0,824	0,813

Таблиця 4

Коефіцієнт умов роботи γ'_c для прокатного двотавра № 20
(прогін 3–9 м)

$\begin{matrix} b_v/b \\ \ell_v/\ell \end{matrix}$	0,1	0,2	0,3	0,4
0,1	0,948	0,897	0,873	0,865
0,3	0,939	0,880	0,853	0,844
0,5	0,934	0,872	0,844	0,834
0,8	0,931	0,866	0,836	0,826
1,0	0,929	0,862	0,832	0,822

Таблиця 5

Коефіцієнт умов роботи γ'_c для прокатного двотавра № 30
(прогін 3–9 м)

$\begin{matrix} b_v/b \\ \ell_v/\ell \end{matrix}$	0,1	0,2	0,3	0,4
0,1	0,959	0,919	0,906	0,896
0,3	0,952	0,906	0,891	0,879
0,5	0,949	0,900	0,884	0,872
0,8	0,946	0,894	0,878	0,865
1,0	0,945	0,891	0,875	0,862

Таблиця 6

Усереднені значення коефіцієнта γ'_c для випадку однобічного вирізу
(прогін 3–9 м)

$\begin{matrix} b_v/b \\ \ell_v/\ell \end{matrix}$	0,1	0,2	0,3	0,4
0,1	0,94	0,89	0,87	0,86
0,3	0,94	0,87	0,85	0,84
0,5	0,93	0,87	0,84	0,83
0,8	0,93	0,86	0,83	0,82
1,0	0,93	0,86	0,83	0,81

Було також визначено коефіцієнт умов роботи γ'_c для випадку розрахунку сталевих балок з горизонтальним вигином. Коли на балку діє рівномірно-розподілене навантаження, складова напружень кручення буде дорівнювати

$$\sigma_\omega = -E \cdot q \cdot f \cdot \frac{\nu}{GI_k} \cdot \omega; \quad q = \frac{8M}{\ell^2}; \quad \frac{E}{G} \approx 2,5;$$

$$\gamma'_c = \frac{\frac{M}{W_B}}{\frac{M}{W_B} + 20 \frac{M}{l^2} f \frac{\nu}{I_k} \omega}. \quad (6)$$

Помножимо кожен складову правої частини рівняння (6) на $\frac{W_g}{M}$:

$$\gamma'_c = \frac{1}{1 + 20 \cdot \frac{W_g}{l^2} \cdot f \cdot \frac{\nu}{I_k} \cdot \omega},$$

де f – стріла прогину; $\nu = 1 - \frac{\text{th}(k \ell/2)}{k \ell/4} \cdot \frac{\text{th}(k \ell/2)}{k \ell/4}$; $\text{th}(\dots)$ – гіперболічний тангенс.

Запишемо $C = \frac{W_g}{l} \cdot \frac{\nu}{I_k} \cdot \omega$, тоді:

$$\gamma'_c = \frac{1}{1 + 20 \cdot \frac{f}{l} \cdot C}. \quad (7)$$

Згідно з формулою (7) були підраховані коефіцієнти γ'_c для п'яти типів прокатних перерізів сталевих двотаврових балок (табл. 7).

Для визначення коефіцієнта γ''_c був використаний запропонований А.В. Перельмутером [2] параметр економічних витрат – ПЕВ, який становить співвідношення між вартістю конструкції B_k та сумою можливих збитків $B_{зб}$. Для аналізу конструкцій з дефектами Пичугіним С.Ф. та Семком О.В. [6, 7] була запропонована методика базової точки та чисельного аналізу ризиків при підсиленні.

Запропонована нижче методика аналізу ризиків розвиває ці методи та дозволяє дати кількісну розрахункову оцінку не лише надійності, а і стану дефектної конструкції: відрізнити стан 2 (задовільний) від стану 3 (непридатний) до нормальної експлуатації та стану 4 (аварійний).

Основним критерієм, за яким балка з дефектом переходить зі стану 2 до стану 3, тобто такого, що потребує планового ремонту, будемо вважати перевищення збитків при відмові балки $R_{зб}$ над ризиком витрат при підсиленні балки R_n . Ризик витрат при підсиленні балки, яке виконується з імовірністю $P_{відс}$, буде становити:

$$R_n = P_{midc} \cdot B_{midc}, \quad (8)$$

де $B_{midc} = k \cdot B_k$ (B_k – вартість балки, а k – перехідний коефіцієнт від вартості балки до вартості конструкцій підсилення).

Таблиця 7

**Коефіцієнт умов роботи γ'_c для балок із горизонтальним вигином
(прогін 3-9 м)**

f/l	№10	№12	№16	№20	№30
0,01	0,94	0,95	0,96	0,97	0,97
0,02	0,89	0,90	0,92	0,93	0,95
0,03	0,84	0,86	0,88	0,90	0,93
0,04	0,79	0,82	0,85	0,88	0,90
0,05	0,76	0,78	0,82	0,85	0,88
0,06	0,72	0,75	0,79	0,83	0,86
0,07	0,69	0,72	0,77	0,80	0,84
0,08	0,66	0,69	0,74	0,78	0,83
0,09	0,63	0,67	0,72	0,76	0,81
0,10	0,61	0,64	0,70	0,74	0,79
0,11	0,58	0,62	0,68	0,72	0,77
0,12	0,56	0,60	0,66	0,70	0,76

За даними дослідного проектування, виконаного авторами на Кременчуцькому сталеливарному заводі, Запорізькому заводі важкого кранобудування, Кременчуцькій ТЕЦ та інших об'єктах України, можна прийняти такі значення k :

- для вирізів та місцевих погинів полиць $k = 0,1$;
- для загального погину та значного корозійного зносу $k = 1$, що відповідає заміні пошкодженої балки.

Коефіцієнт k для інших об'єктів може мати інші значення, що не впливає на суть запропонованого методу.

Ризик втрат $R_{зб}$ при відмові балки визначається за формулою

$$R_{зб} = B_{зб} \cdot Q_{б}, \quad (9)$$

де $Q_{б}$ – імовірність відмови балки, яку можна визначити за будь-якою загальною методикою, причому $Q_{б}$ може складатись з $Q_{бр}$ – початкової імовірності відмови та $Q_{бд}$ – імовірності відмови балки з дефектами.

Отже, при порівнянні значень $R_{зб}$ та R_n можна визначити стан конструкції.

Для стану 2 – задовільного:

$$R_n > R_{зб}, \quad (10)$$

тобто, ризик витрат на підсилення перевищує ризик від можливих збитків при відмові балки. З економічної та страхової точки зору підсилення балки з таким дефектом – недоцільне.

Для стану 3 – непридатного до нормальної експлуатації:

$$R_n \leq R_{зб}, \quad (11)$$

тобто, ризик втрат на підсилення менший, ніж ризик від можливих збитків при відмові балки, значить підсилення доцільне і необхідне.

Для стану 4 – аварійного:

$$R_n \ll R_{зб}. \quad (12)$$

Ризик втрат на підсилення значно (в 10^2-10^3 і більше разів) менший, ніж ризик збитків при відмові балки. Слід терміново виконати підсилення, адже при врахуванні фактору часу ризик від збитків значно збільшується.

Розкриємо граничне рівняння між станами 2 та 3 з формули (11):

$$P_{нідс} \cdot B_{нідс} = B_{зб} \cdot Q_б, \quad (13)$$

при $P_{нідс} = 1$, а $B_{зб} = B_k \cdot ПЕВ$; $B_{нідс} = k \cdot B_k$, отримаємо

$$k = ПЕВ \cdot Q_б. \quad (14)$$

При відомих різновидах дефектів $k \approx const$, на розмежування станів балки з дефектом впливатиме імовірність відмови $Q_б$ та параметр економічних витрат, який може змінюватись від 1 (балки робочих майданчиків допоміжних підприємств) до 10^4 і більше (балки покриття АЕС і т.п.).

Якщо відомі апріорі для об'єкта та дефектної балки значення k і $ПЕВ$, можна отримати граничне значення імовірності відмови

$$Q_{2-3}: Q_{2-3} = \frac{k}{ПЕВ} \quad (15)$$

і за таблицями нормального розподілу визначити відповідно характеристику безпеки за Ржаніциним β_{2-3} .

Порівняння середньої граничної несучої здатності балки з дефектом

$$\bar{M}_{2-3} = \beta_{2-3} \left(\sqrt{\hat{M}_R^2 + \hat{M}_q^2} \right) + \bar{M}_q \quad (16)$$

та балки без дефектів $\bar{M}_0 = \bar{W}_0 \cdot \bar{\sigma}$ дозволяє визначити граничні значення коефіцієнта умов роботи γ_c'' :

$$\gamma_{c,2-3}'' = \frac{\bar{W}_0 \cdot \bar{\sigma}}{\beta_{2-3} \left(\sqrt{\hat{M}_R^2 + \hat{M}_q^2} \right) + M_q} \quad (17)$$

Значення цього коефіцієнта для кожного конкретного об'єкта залежать від відносної вартості підсилення k та параметра економічних втрат ПЕВ.

Чисельні значення коефіцієнтів γ_c'' представлені в табл. 8÷9.

Таблиця 8

**Коефіцієнт умов роботи γ_c'' для балок із вирізами в полицях
(прогін 3-9 м)**

ПЕВ b_v/b	1	10	100	1000
0,01	1,10	1,0	0,95	0,90
0,02	1,15	1,01	0,94	0,85
0,03	1,20	1,02	0,92	0,80
0,04	1,25	1,03	0,93	0,75

Таблиця 9

**Коефіцієнт умов роботи γ_c'' для балок із загальним вигином γ_c''
(прогін 3-9 м)**

ПЕВ f/l	1	10	100	1000
0,01	1,05	0,97	0,89	0,80
0,02	1,10	0,97	0,84	0,70
0,03	1,15	0,98	0,80	0,60
0,04	1,25	0,99	0,75	0,50
0,05	1,40	1,01	0,68	0,40

Висновок

Розроблена методика оцінки технічного стану сталевих балок перекриттів, а також визначення значення коефіцієнта умов роботи на основі теорії ризиків. Значення додаткового коефіцієнта умов роботи γ_c' для балок із однобічними вирізами знаходиться в межах від 0,81 до 0,94, для балок із горизонтальним вигином – від 0,56 до 0,97. Значення коефіцієнта умов роботи γ_c'' для балок із однобічними вирізами знаходиться в межах від 0,75 до 1,25, для балок із горизонтальним вигином – від 0,40 до 1,40.