ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РИСКОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ БАЛОК С ДЕФЕКТАМИ

УДК 624.014.25

Пичугин Сергей Федорович
Заведующий кафедрой конструкций из металла, дерева и пластмассы Полтавского национального технического университета им.Ю.Кондратюка, доктор технических наук, профессор, академик Академии строительства Украины

Семко Александр Владимирович
Заведующий кафедрой архитектуры и городского строительства Полтавского национального технического университета им.Ю.Кондратюка, доктор технических наук, профессор, академик Академии строительства Украины

Семко Владимир Александрович
Доцент кафедры архитектуры и городского строительства Полтавского национального технического университета им.Ю.Кондратюка, кандидат технических наук

Теория рисков получает все более широкое применение для анализа надежности строительных конструкций [1-3], особенно конструкций с чисто экономической ответственностью, то есть без учета возможности человеческих жертв.

Рассматриваются стальные балки с дефектами, для которых разработана инженерная методика расчета на основании исследований [4, 5]. Для этого в формулу проверки прочности балки введем коэффициент условий работы $\gamma_c = \gamma'_c \cdot \gamma''_c$. Этот коэффициент будет учитывать составляющую напряжений кручения при постоянном уровне надежности. Таким образом, условие прочности примет следующий вид:

$$\frac{M}{W_в} \le R_y \cdot \gamma'_c \cdot \gamma''_c, \tag{1}$$

где $W_в$ – минимальный момент сопротивления поврежденного дефектом сечения стальной балки;

γ'_c – коэффициент условий работы, который для дефекта в виде одностороннего выреза определяется по формуле (2);

γ''_c – коэффициент условий работы, который зависит от параметра экономического ущерба и будет определен ниже.

$$\gamma'_c = \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_{изг} + k_\ell \cdot \sigma_{кр}}, \tag{2}$$

где $\sigma_{изг}$ – напряжения, которые возникают от действия изгибающего момента;

σ_{ϖ} – напряжения, которые возникают от кручения сечения;

k_{ℓ} – коэффициент, характеризующий степень развития напряжений кручения в поврежденной балке.

$$k_{\ell} = 0.12 \cdot \ln\left(\frac{\ell_{в}}{\ell}\right) + 1, \tag{3}$$

где $\ell_{в}$ – длина выреза;

ℓ – пролет балки;

$b_{в}$ – глубина выреза.

Раскроем выражение (2) для нагрузки в виде сосредоточенной силы посредине пролета.

$$\sigma_{изг} = \frac{M}{W_{в}}; \qquad \sigma_{\omega} = -E \cdot \frac{F \cdot e \cdot k}{GI_{k}} \cdot \frac{sh^{2}\left(k\frac{\ell}{2}\right)}{sh(k\ell)} \cdot \omega;$$

$$F = \frac{4M}{\ell}; \ \frac{E}{G} \approx 2.5; \ A = \frac{e \cdot k}{I_{k}} \cdot \omega;$$

$$\gamma_{c}' = \frac{\dfrac{M}{W_{в}}}{\dfrac{M}{W_{в}} + 10 \cdot k_{\ell} \cdot \dfrac{A \cdot M}{\ell} \cdot \dfrac{sh^{2}\left(k\frac{\ell}{2}\right)}{sh(k\ell)}}. \tag{4}$$

где ω – секториальная площадь в месте определения напряжений;

$sh(...)$ – гиперболический синус;

$k = \sqrt{\dfrac{GI_{K}}{EI_{\varpi}}}$ – изгибно-крутильная характеристика балки;

I_{K}, I_{ϖ} – момент инерции при свободном кручении и секториальный момент инерции соответственно;

e – эксцентриситет приложения внешней нагрузки (расстояние от центра кручения до оси *y-y* неповрежденного сечения балки).

Умножим все составляющие правой части выражения (4) на $\dfrac{W_{в}}{M} \cdot \ell \cdot sh(k\ell)$

$$\gamma_{c}' = \frac{\ell \cdot sh(k\ell)}{\ell \cdot sh(k\ell) + 10 \cdot k_{\ell} \cdot A \cdot W_{в} \cdot sh^{2}\left(k\frac{\ell}{2}\right)}.$$

Запишем $B = A \cdot W_в$, тогда

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

Как видно, коэффициент условий работы γ_c' не зависит от величины нагрузки, а зависит лишь от геометрии дефекта, сечения и пролета стальной балки.

Согласно формуле (5) были насчитаны коэффициенты γ_c' для пяти типов прокатных сечений стальных двутавровых балок. Они приведены в табл.1-5.

Таблица 1

Коэффициент условий работы γ_c' для прокатного двутавра №10 (пролет 3-9 м)

$\ell_в/\ell$	$b_в/b$			
	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

Таблица 2

Коэффициент условий работы γ_c' для прокатного двутавра №12 (пролет 3-9 м)

$\ell_в/\ell$	$b_в/b$			
	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

Таблица 3

Коэффициент условий работы γ_c' для прокатного двутавра №16 (пролет 3-9 м)

ℓ_e/ℓ	b_e/b			
	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

Таблица 4

Коэффициент условий работы γ_c' для прокатного двутавра №20 (пролет 3-9 м)

ℓ_e/ℓ	b_e/b			
	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

Таблица 5

Коэффициент условий работы γ_c' для прокатного двутавра №30 (пролет 3-9 м)

ℓ_e/ℓ	b_e/b			
	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

Таблица 6

Усредненные значения коэффициента γ_c' для случая балки с односторонним вырезом в полке (пролет 3-9 м)

$\ell_в/\ell$	$b_в/b$			
	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

Был также определен коэффициент условий работы γ_c' для расчета стальных балок с горизонтальным выгибом.

Когда на балку действует равномерно-распределенная нагрузка, составляющая напряжений кручения будет равняться

$$\sigma_\omega = -E \cdot q \cdot f \cdot \frac{\nu}{GI_k} \cdot \omega; \quad q = \frac{8M}{\ell^2}; \qquad \frac{E}{G} \approx 2.5;$$

$$\gamma_c' = \frac{\dfrac{M}{W_в}}{\dfrac{M}{W_в} + 20 \cdot \dfrac{M}{\ell^2} \cdot f \cdot \dfrac{\nu}{I_k} \cdot \omega}. \tag{6}$$

Умножим каждую составляющую правой части уравнения (6) на $\dfrac{W_в}{M}$

$$\gamma_c' = \frac{1}{1 + 20 \cdot \dfrac{W_в}{\ell^2} \cdot f \cdot \dfrac{\nu}{I_k} \cdot \omega},$$

где f – стрела погиба;

$\nu = 1 - \dfrac{th\left(k\,\ell/2\right)}{k\,\ell/4} \cdot \dfrac{th\left(k\,\ell/2\right)}{k\,\ell/4}$; $th(\ldots)$ – гиперболический тангенс.

Запишем $C = \dfrac{W_в}{\ell} \cdot \dfrac{\nu}{I_k} \cdot \omega$, тогда

$$\gamma_c' = \frac{1}{1 + 20 \cdot \frac{f}{\ell} \cdot C}. \qquad (7)$$

По формуле (7) были рассчитаны значения коэффициентов γ_c' для пяти типов сечений прокатных стальных двутавровых балок. Их значения приведены в таблице 7.

Для определения коэффициента γ_c'' был использован параметр экономического ущерба – ПЭУ, предложенный А.В. Перельмутером [2], который является отношением между стоимостью конструкции $C_к$ и суммой возможного ущерба $C_{ущб}$. Для анализа конструкций с дефектами Пичугиным С.Ф. и Семко А.В. [6, 7] была предложена методика базовой точки и численного анализа рисков при усилении.

Таблица 7

Коэффициент условий работы γ_c' для балок с горизонтальным выгибом (пролет 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

Предложенная ниже методика анализа рисков развивает эти методы и позволяет дать количественную расчетную оценку не только надежности, а и состояния дефектной конструкции: отличить состояние 2 – удовлетворительное от состояния 3 – непригодного к нормальной эксплуатации и состояния 4 – аварийного (название состояний даны согласно нормам Украины [8]).

Основным критерием, по которому балка с дефектом переходит из состояния 2 в состояние 3, которое требует планового ремонта, будем

считать превышение риска ущерба при отказе балки $R_{ущб}$ над риском ущерба при усилении балки $R_{усил}$. Риск ущерба при усилении балки, которое выполняется с вероятностью $P_{усил}$, будет составлять

$$R_{усил} = P_{усил} \cdot C_{усил}, \tag{8}$$

где $C_{усил}=k \cdot C_к$, где $C_к$ – стоимость балки, а k – переходной коэффициент от стоимости балки к стоимости конструкций усиления.

По данным опытного проектирования, выполненного авторами на промышленных объектах Украины, можно принять следующие значения k для стальных балок с дефектами:

– для вырезов и местных погибах полок k=0.1;
– для общего выгиба и значительного коррозионного износа k=1, что соответствует замене поврежденной балки.

Коэффициент k для других объектов может иметь другие значения, что не влияет на суть предложенного метода.

Риск ущерба $R_{ущб}$ при отказе балки определяется по формуле

$$R_{ущб} = C_{ущб} \cdot \mathrm{Q}_б, \tag{9}$$

где $Q_б$ – вероятность отказа балки, которую можно определить по любой общепризнанной методике, причем $Q_б$ может состоять из $Q_{бн}$ – начальной вероятности отказа и $Q_{бд}$ – вероятности отказа балки с дефектами.

Таким образом, при сравнении значений $R_{ущб}$ и $R_{усил}$ можно определить состояние конструкции.

Для состояния 2 – удовлетворительного имеем:

$$R_{усил} > R_{ущб}, \tag{10}$$

то есть риск ущерба при усилении превышает риск от возможного ущерба при отказе балки. С экономической и страховой точки зрения усиление балки с таким дефектом – нерационально.

Для состояния 3 – непригодного к нормальной эксплуатации – запишем:

$$R_{усил} \le R_{ущб}, \tag{11}$$

Поскольку риск затрат на усиление меньший, чем риск от возможных затрат при отказе балки, значит усиление рационально и необходимо.

Для состояния 4 – аварийного

$$R_{усил} << R_{ущб}. \tag{12}$$

Риск затрат на усиление значительно (в 10-10^3 и больше раз) меньший, чем риск затрат при отказе балки. Поэтому следует немедленно выполнить усиление, потому что при учете фактора времени риск от ущерба значительно увеличивается.

Раскроем граничное условие между состояниями 2 та 3 из формулы (11):

$$P_{усил} \cdot C_{усил} = C_{ущб} \cdot \mathrm{Q}_{б}, \tag{13}$$

при $P_{усил}$=1, а $C_{ущб}=C_к \cdot ПЕУ$; $C_{усил}=k \cdot C_к$, получаем

$$k = ПЕУ \cdot \mathrm{Q}_{б}. \tag{14}$$

При известных видах дефектов $k \approx const$, на разделение состояний балки с дефектом влияет вероятность отказа $Q_б$ и параметр экономического ущерба, который может изменяться от 1 (балки рабочих площадок вспомогательных предприятий) до 10^4 и больше (балки покрытия АЭС и т.п.).

Если для объекта и дефектной балки известны значения k и *ПЭУ,* можно получить граничное значение вероятности отказа $Q_{2\text{-}3}$:

$$Q_{2-3} = \frac{k}{ПЭУ}, \tag{15}$$

и по таблицам нормального распределения определить соответственно характеристику безопасности по А.Р. Ржаницыну $\beta_{2\text{-}3}$.

Сравнение средней несущей способности балки с дефектом

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

и балки без дефектов

$$\overline{M}_0 = \overline{W}_0 \cdot \sigma$$

позволяет определить предельные значения коэффициента условий работы γ_c''

$$\gamma''_{c,2-3} = \frac{\overline{W}_0 \cdot \sigma}{\beta_{2-3}\left(\sqrt{\hat{M}_R^2 + \hat{M}_q^2}\right) + M_q}. \tag{17}$$

Значения этого коэффициента для каждого конкретного объекта зависят от относительной стоимости усиления k и параметра экономического ущерба *ПЭУ*.

Численные значения коэффициентов γ_c'' представлены в табл.8,9.

Таблица 8

Коэффициент условий работы γ_c'' для балок с вырезами в полке (пролет 3-9 м)

b_v/b	*ПЕУ*			
	0,1	0,2	0,3	0,4
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

Таблица 9

Коэффициент условий работы γ_c'' для балок с общим выгибом γ_c'' (пролет 3-9 м)

f/ℓ	*ПЕУ*			
	0,1	0,2	0,3	0,4
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

Вывод. Разработана методика оценки технического состояния стальных балок перекрытий, а также определения значения коэффициента условий работы на основании теории рисков. Значения дополнительного коэффициента условий работы γ_c' для балок с односторонними вырезами колеблется в пределах от 0,81 до 0,94, для балок с горизонтальным выгибом от 0,56 до 0,97. Значения коэффициента условий работы γ_c'' для балок с односторонними вырезами колеблется в пределах 0,75-1,25, для балок с горизонтальным выгибом от 0,40 до 1,40.

Библиографический список

1. Корчак М.Д. Влияние геометрических несовершенств на несущую способность легких металлических конструкций: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.01 / Московский государственный университет. – М.: МГСУ, 1993. -39с.
2. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности строительных конструкций. –Киев: Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 1999. - 212 с.

3. Семко О.В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталезалізобетонних конструкцій. –Киев: Сталь. -2004. -316с.
4. Пичугин С.Ф., Семко В.А. Расчет стальных балок с односторонним вырезом в полке // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. тр. – Выпуск 7. – Магнитогорск: ООО «МиниТип». –2007. – С.96-105.
5. Семко В.О. Оцінка надійності сталевих балок з дефектами. Автореф. дис. … кандидата техн. наук / ПолтНТУ. – Полтава., 2007. – 20с.
6. Пичугин С.Ф., Семко А.В., Махинько А.В. К определению коэффициента надежности по назначению с учетом рисков в строительстве // Известия вузов. Строительство. - №11-12. – С.104-109.
7. Семко О.В. Надійність сталезалізобетонних конструкцій: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / ПолтНТУ ім.. Ю.Кондратюка – Полтава: ПолтНТУ, 2006. – 34 с.
8. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель та споруд. – Київ. 1997. – 145 с.