

ВПЛИВ КРУТИЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ ПРОФІЛЬОВАНОГО НАСТИЛУ НА СТІЙКІСТЬ СТАЛЕВИХ БАЛОК

INFLUENCE OF ROTATIONAL STIFFNESS OF PROFILED FLOORING ON STABILITY OF STEEL BEAMS

к.т.н., доцент Семко В.О., к.т.н. Гудзь С.А. (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)
c.t.s., associate professor Semko V.O., c.t.s. Guds S.A. (Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk)

Постановка проблеми у загальному вигляді. При передачі навантаження через суцільний жорсткий настил, який безперервно спирається на стиснутий пояс і надійно з ним з'єднується, а також при дотриманні вимог п. 1.5.4.4 ДБН В.2.6-163:2010 [1] перевірка стійкості балки двотаврового перерізу, що згинається у площині стінки або у двох площинах, зазвичай, не виконується. У разі застосування плоского і профільованого металевих настилів надійним необґрунтовано вважається з'єднання їх зі стиснутим поясом балки зварюванням, на болтах або самонарізних гвинтах з дотриманням конструктивних вимог до з'єднання. В інших випадках, при недостатньому закріпленні стиснутого поясу, потрібно виконати розрахунок стійкості балки за формулою з коефіцієнтом стійкості при згині φ_b . Але виникає питання: коли жорсткості профільованого настилу достатньо для забезпечення стійкості балки, яка виконує роль прогону легкої покрівлі. Проте вплив жорсткості профільованого настилу на підвищення стійкості балки в українських нормах ніяк не відображено. Тому розроблення методів урахування жорсткості огорожувальних конструкцій при розрахунку сталевих балок є актуальною науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень. Якщо настил жорстко приєднаний до верхнього поясу, то він перешкоджає закручуванню і втраті стійкості балки за згинально-крутильною формою. Згідно з європейськими нормами [2, 4] розрахунок стійкості балки, який полягає у визначенні критичного згинального моменту, при дії поздовжнього стискувального зусилля, що не перевищує 10 % критичної сили, проводити не потрібно за наявності достатньої крутильної жорсткості

настилу. Для цього слід спочатку визначити зсувну жорсткість настилу і порівняти її з потрібною. Вільна вісь обертання балки приймається, коли наявна зсувна жорсткість профільованого настилу менша від потрібної ($S < S_1$). При достатній зсувній жорсткості ($S \geq S_1$) вважається, що стиснутий пояс повністю закріплений від поперечних зміщень і вісь обертання, котру в даному випадку називають обмеженою (зв'язаною), проходить по верху балки. Рекомендації щодо визначення зсувної жорсткості профільованого настилу наведено у джерелах [3, 5, 7, 8, 9]. У роботах [5, 6] зазначається, що вираз для визначення потрібної зсувної жорсткості має внутрішню суперечність, яка полягає у збільшенні потрібної зсувної жорсткості профільованого настилу при зменшенні прольоту балки. Дослідження [6] показали, що для досягнення обмеженої осі обертання потрібна значно менша зсувна жорсткість.

Теоретичні дослідження напружено-деформованого стану і стійкості тонкостінних сталевих балок, розкріплених профільованим настилом, представлені в роботах С.І. Сладкова [10], С.І. Білика [11]. Також стабілізуючий вплив настилу на балки аналізується в статті [12].

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми.

Питання впливу крутильної жорсткості профільованого настилу на підвищення несучої здатності сталевих балок за рахунок забезпечення їхньої стійкості залишається відкритим і потребує ґрунтовних експериментально-теоретичних досліджень.

Постановка мети і задач досліджень. В роботі поставлено за мету навести методику визначення та перевірки достатньої крутильної жорсткості сталевого профільованого настилу з можливістю нехтування деформаціями з'єднання для виявлення його впливу на загальну стійкість і напружено-деформований стан сталевих балок.

Виклад основного матеріалу. Закручування статично визначних балок не відбувається, якщо зсувної жорсткості профільованого настилу достатньо для забезпечення повного закріплення стиснутого поясу балки від поперечних зміщень. У всіх інших випадках необхідно перевіряти розрахунком достатню крутильну жорсткість профільованого настилу за формулою:

$$c_{g,k} \geq \frac{M_{pl,x,k}^2}{EI_y} k_g k_v, \text{ [кНм/м]}, \quad (1)$$

де $M_{pl,x,k}$ – характеристична несуча здатність балки за згинальним моментом відносно осі x у пластичній стадії (назви осей вітчизняні);

E – модуль пружності сталі;

I_y – момент інерції перерізу відносно осі y ;

k_g – коефіцієнт, що враховує розподіл згинального моменту в балці; при вільній осі обертання шарнірно опертої по кінцях балки та рівномірно розподіленому навантаженні дорівнює 4; при обмеженій – 0, в інших випадках визначається за табл. ВВ.1 [2] або табл. 6 [4];

k_v – коефіцієнт, який залежить від виду розрахунку (при пластичному розрахунку $k_v = 1$, при пружному – $k_v = 0,35$).

Значення потрібної крутильної жорсткості дозволяється зменшувати відповідно до ступеня використання поперечного перерізу балки для сприйняття розрахункового згинального моменту.

Наявна крутильна жорсткість профільованого настилу $C_{g,k}$ може бути інтерпретована як система пружин, що послідовно включаються в роботу, і визначена з рівняння:

$$C_{g,k} = \left(\frac{1}{C_{gM,k}} + \frac{1}{C_{gA,k}} + \frac{1}{C_{gP,k}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

де $C_{gM,k}$ – теоретична крутильна жорсткість, обумовлена згинальною жорсткістю настилу;

$C_{gA,k}$ – крутильна жорсткість, обумовлена деформаціями з'єднання;

$C_{gP,k}$ – крутильна жорсткість, обумовлена деформаціями закріпленої балки.

Перша складова крутильної жорсткості $C_{gM,k}$ визначається за умови прийняття жорсткого з'єднання балки і настилу з виразу:

$$C_{gM,k} = \frac{EI_a}{a} k, \quad (3)$$

де I_a – погонний момент інерції настилу;

a – відстань між балками, що закріплені настилом;

k – коефіцієнт, який залежить від розрахункової схеми балок, закріплених настилом (для одно- і двопролітних балок $k = 2$, для нерозрізних балок з трьома і більше прольотами $k = 4$).

Крутильна жорсткість $C_{gA,k}$ враховує вплив деформацій настилу і з'єднувальних засобів. Якщо в місці з'єднання не відбувається

взаємного зміщення (наприклад, при жорсткому з'єднанні сталеві балки і залізобетонного настилу), то цією частиною нехтують. Значення крутильної жорсткості $c_{gA,k}$ при з'єднанні сталеві балки і профільованого настилу самонарізними гвинтами можна отримати за допомогою наступних формул:

$$c_{gA,k} = \bar{c}_{gA,k} \left(\frac{b_o}{10} \right)^2 \quad \text{при } \frac{b_o}{10} \leq 1,25; \quad (4)$$

$$c_{gA,k} = \bar{c}_{gA,k} \left(\frac{b_o}{10} \right) 1,25 \quad \text{при } 1,25 \leq \frac{b_o}{10} \leq 2,0, \quad (5)$$

де $\bar{c}_{gA,k}$ – експериментально встановлене значення жорсткості профільованого настилу при ширині верхнього поясу закріпленої балки $b_o = 10$ см;

b_o – ширина верхнього поясу закріпленої настилом балки в см.

Значення експериментальної жорсткості $\bar{c}_{gA,k}$ для профільованого настилу товщиною $t_n \leq 0,75$ мм, що приєднаний до балки самонарізними гвинтами діаметром $d \geq 6,3$ мм, наведено в табл. 7 DIN 18800 [4]. Якщо профільований настил має товщину $t_n > 0,75$ мм, то відповідне значення жорсткості слід помножити на величину $(t_n/0,75)^2$. Для відношення $b_o/10 > 2,0$ приймається на підставі збільшення надійності $b_o/10 = 2,0$.

У нормах EN 1993-1-3 [3] наведено розширену методику визначення крутильної жорсткості профільованого настилу $c_{gA,k}$.

Нехтування деформаціями з'єднання відповідно до [6] може відбуватись, якщо контактний момент більший за редукований приєднувальний момент між профільованим настилом і балкою ($m_k > redm_g$). Зворотній крутий контактний момент, який виникає від зовнішнього навантаження і дорівнює погонному крутному навантаженню при спиранні профільованого настилу на один край полочки внаслідок закручування балки, для двотаврової балки визначається за формулою:

$$m_k = q_y \frac{b_0}{2}, \quad (6)$$

де q_y – рівномірно розподілене навантаження, що діє на балку вздовж осі y .

Редукований крутний приєднувальний момент визначається за формулою:

$$redm_g = m_g \frac{M_{x,Ed}}{M_{pl,x,Rd}}, \quad (7)$$

де m_g – приєднувальний момент;

$M_{x,Ed}$ – розрахунковий згинальний момент відносно осі x ;

$M_{pl,x,Rd}$ – розрахункова несуча здатність балки за згинальним моментом відносно осі x у пластичній стадії.

Приєднувальний момент визначається за формулою:

$$m_g = \frac{0,075}{\zeta^2} \frac{M_{pl,x,k}^2}{EI_y} = 0,015k_g \frac{M_{pl,x,k}^2}{EI_y}, \quad (8)$$

де $\zeta = \sqrt{\frac{5}{k_g}}$ – коефіцієнт, що враховує розподіл згинального моменту в балці.

Остання частина крутильної жорсткості $c_{gp,k}$ отримується за [13] з рівняння:

$$c_{gp,k} = \frac{E}{4(1-\nu_{st}^2)} \frac{1}{\frac{h_s}{t_w^3} + 0,5 \frac{b_o}{t_o^3}}, \quad (9)$$

де ν_{st} – коефіцієнт поперечної деформації сталі (коефіцієнт Пуассона);

h_s – відстань між центрами ваги поясів закріпленої балки;

t_w – товщина стінки закріпленої балки;

t_o – товщина верхнього поясу закріпленої настилом балки.

При застосуванні формули (9) слід зазначити, що в ній не враховано вплив прикладення значних зосереджених сил і можливого пошкодження стінки балки. Тому потрібно забезпечувати, щоб зосереджене навантаження складало не більше 50 % загального навантаження.

Для практичних розрахунків стійкості шарнірно обіпертих по кінцях однопролітних сталевих балок із урахуванням профільованого настилу

при недостатній жорсткості можливе застосування спрощеної методики, згідно з якою підвищення крутильної жорсткості балки враховується шляхом уведення у розрахунок збільшеного умовного (ідеального) моменту інерції перерізу при чистому крученні, котрий визначається у відповідності до [6] за формулою:

$$I_{d,i} = I_d + c_{g,k} \frac{L^2}{\pi^2 G} + S \frac{y_s^2}{G}, \quad (10)$$

де I_d – момент інерції перерізу при чистому крученні;

L – проліт балки;

G – модуль зсуву сталі;

S – зсувна жорсткість профільованого настилу;

y_s – відстань по висоті від місця закріплення профільованого настилу до центру ваги балки.

Для визначення приведеної гнучкості при згинальному моменті ($\bar{\lambda}_M = \sqrt{M_{pl,x,k} / M_{Ki,x,k}}$), залежно від якої встановлюється зменшувальний коефіцієнт стійкості при згині за європейськими нормами, потрібно знати умовний критичний згинально-крутильний момент $M_{Ki,x,k}$, який при двотавровому перерізі балки може визначатися за формулою:

$$M_{Ki,x,k} = \zeta N_{Ki,y,k} \left(\sqrt{c^2 + 0,25y_p^2} + 0,5y_p \right), \quad (11)$$

де $N_{Ki,y,k} = \pi^2 EI_y / L^2$ – критична стискувальна сила;

$$c^2 = \frac{I_\omega}{I_y} + \frac{L^2}{\pi^2} \frac{GI_{d,i}}{EI_y} = \frac{I_\omega + 0,039L^2 I_{d,i}}{I_y} \quad \text{– крутий радіус}$$

інерції (тут I_ω – секторіальний момент інерції перерізу балки);

y_p – відстань по висоті від місця прикладення навантаження до центру ваги балки (для розтягнутого поясу – додатна величина).

Висновки. Профільований настил може не тільки виконувати функцію огорожувальної конструкції, але й ефективно використовуватись для закріплення сталевих балок від закручування та втрати стійкості, таким чином зменшуючи ступінь використання перерізу і витрати сталі.

Література

1. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / Остаточна редакція. Видання офіційне. – Надано чинності з 1 вересня 2011 р. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 226 с.
2. prEN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2003. – 90 p.
3. prEN 1993-1-3. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, 2004. – 125 p.
4. DIN 18 800 Teil 2: Stahlbauten – Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken, 1990. – 44 s.
5. Heil W. Stabilisierung von biegedrillknickgefährdeten Trägern durch Trapezblechscheiben / W. Heil // Stahlbau 56 (1994), S. 169 – 178.
6. Vogel U. Traglast-Tabellen, Tabellen für die Bemessung durchlaufender I-Träger mit und ohne Normalkraft nach dem Traglastverfahren (DIN 18800, Teil 2) / U. Vogel, W. Heil. – Verlag Stahl-Eisen, 1996. – 55 s.
7. Брудка Я. Стальные складчатые конструкции в строительстве / Я. Брудка, Р. Гарнцарек, К. Милачевски; Пер. с пол. Л.Б. Шаринова. – К.: Будивельник, 1989. – 152 с.
8. СТО 0043-2005. Настилы стальные профилированные для покрытий зданий и сооружений. Проектирование, изготовление, монтаж. – М.: „ЦНИИПСК им. Мельникова”, ЗАО „Хилти Дистрибьюшн Лтд”, 2005. – 37 с.
9. Гудзь С.А. Забезпечення жорсткості сталевого профільованого настилу при розрахунку прогонів легкої похилої покрівлі / С.А. Гудзь // Сб. науч. трудов "Современные строительные конструкции из металла и древесины". – № 15. – Часть 3. – Одесса, 2011. – С. 29 – 33.
10. Сладков С.И. Устойчивость плоской формы изгиба балок с настилом / С.И. Сладков // Соппротивление материалов и теория сооружений. Вып. 55. – К.: Будівельник, 1989. – С. 86 – 89.
11. Білик С.І. Сталеві балки, розкріплені профільованим настилом / С.І. Білик // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Технічні науки (будівництво). – № 45. – Луганськ: МАП України, ЛНАУ, 2005. – С. 85 – 91.
12. Lindner J. Stabilisierung von Trägern durch Trapezbleche / J. Lindner // Stahlbau 56 (1987), S. 9 – 15.
13. Lindner J. Stahlbauten, Erläuterungen zu DIN 18 800, Teil 1 bis Teil 4 / J. Lindner, J. Scheer, H. Schmidt. – Beuth Verlag, Berlin; Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1994. – 480 s.