

УДК 624.072.2.014.2-413:624.072.9

*С.А. Гудзь, к.т.н., ст. викладач
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БАЛОК-РИГЕЛІВ ЗА РАХУНОК ЖОРСТКОСТІ ПРОГОНІВ І ХРЕСТОВИХ В'ЯЗЕЙ

Наведено методикау визначення та перевірки достатньої жорсткості дискретних в'язей (прогонів і хрестових в'язей), а також досліджено за різними нормами максимальні їх кроки, при яких загальна стійкість сталевих балок, котрі виконують роль ригелів поперечної рами каркасної будівлі, не перевіряється.

Ключові слова: *стійкість, сталеві балки, жорсткість, прогони, хрестові в'язі.*

УДК 624.072.2.014.2-413:624.072.9

*С.А. Гудзь, к.т.н., ст. преподаватель
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЛЬНЫХ БАЛОК-РИГЕЛЕЙ ЗА СЧЕТ ЖЕСТКОСТИ ПРОГОНОВ И КРЕСТОВЫХ СВЯЗЕЙ

Приведена методика определения и проверки достаточной жёсткости дискретных связей (прогонов и крестовых связей), а также исследованы по разным нормам максимальные их шаги, при которых общая устойчивость стальных балок, которые исполняют роль ригелей поперечной рамы каркасного здания, не проверяется.

Ключевые слова: *устойчивость, стальные балки, жёсткость, прогоны, крестовые связи.*

UDC 624.072.2.014.2-413:624.072.9

*S.A. Guds, Ph.D.
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

ENSURING OF STABILITY OF STEEL BEAMS-TRANSOMS ON ACCOUNT OF STIFFNESS OF PURLINS AND CROSS BRACES

Methodology over of determination and verification of sufficient stiffness of discrete braces (purlins and cross braces) is brought, and also their maximal steps, which general stability of steel beams, which carry out the role of transoms of transversal frame of framework building, is unchecked at, are investigational on different norms.

Keywords: *stability, steel beams, stiffness, purlins, cross braces.*

Вступ. При дотриманні вимог нормативного документа [1, п. 1.5.4.4] стійкість балки двотаврового перерізу, що згинається у площині стінки або у двох площинах, зазвичай не перевіряється. В інших випадках, при недостатньому закріпленні стиснутого пояса, потрібно виконати розрахунок стійкості балки за формулою з

коефіцієнтом стійкості при згині φ_b . Але виникає питання: коли жорсткості в'язей достатньо для забезпечення стійкості балки, яка виконує роль ригеля поперечної рами? Проте вплив жорсткості в'язей на підвищення стійкості балки в українських нормах ніяк не відображено. Тому розроблення методів урахування жорсткості в'язей при розрахунку сталевих балок є актуальною науково-технічною проблемою.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Якщо в'язі жорстко приєднані до верхнього пояса, то вони перешкоджають закручуванню і втраті стійкості балки за згинально-крутильною формою. Згідно з європейськими нормами [2, 3] розрахунок стійкості балки, який полягає у визначенні критичного згинального моменту, при дії поздовжнього стискувального зусилля, що не перевищує 10% критичної сили, виконувати не потрібно за наявності достатньої крутильної жорсткості в'язей. Для цього слід спочатку визначити зсувну жорсткість в'язей і порівняти її з потрібною. Вільна вісь обертання балки приймається, коли наявна зсувна жорсткість в'язей, менша від потрібної ($S < S_1$). При достатній зсувній жорсткості ($S \geq S_1$) вважається, що стиснутий пояс повністю закріплений для уникнення поперечних зміщень і вісь обертання, котру в цьому випадку називають обмеженою (зв'язаною), проходить по верху балки. У роботі [4] зазначається, що вираз для визначення потрібної зсувної жорсткості має внутрішню суперечність, яка полягає у збільшенні потрібної зсувної жорсткості в'язей при зменшенні прольоту балки. Дослідження [4] показали, що для досягнення обмеженої осі обертання потрібна значно менша зсувна жорсткість. Рекомендації щодо визначення зсувної жорсткості в'язей наведено у джерелі [5]. Розрахунок стабілізуючих в'язей на основі просторової моделі для опису стабілізуючих навантажень на сталеві балки міститься в роботі [6]. Основи дослідження надання стійкості сталевим балкам за рахунок жорсткості прогонів, що кріпляться до стиснутого пояса балок, закладено в статті [7].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Питання впливу крутильної жорсткості та кроку дискретних в'язей на підвищення несучої здатності сталевих балок за рахунок забезпечення їхньої загальної стійкості й сумісної роботи залишається відкритим і потребує ґрунтовних експериментально-теоретичних досліджень.

Постановка завдання. У роботі поставлено за мету навести методiku визначення та перевірки достатньої жорсткості дискретних в'язей для виявлення їх впливу на загальну стійкість і напружено-деформований стан сталевих балок, а також порівняти максимальні кроки в'язей.

Основний матеріал і результати. Сталеві балки можуть розкріплюватися за допомогою різних видів стабілізуючих конструкцій: залізобетонної плити, сталевого профільованого настилу, прогонів, хрестових в'язей (рис. 1). Перші дві конструкції можна віднести до континуальних в'язей, інші дві належать до дискретних. Ці конструкції зменшують розрахункову довжину балки та підвищують її загальну стійкість.

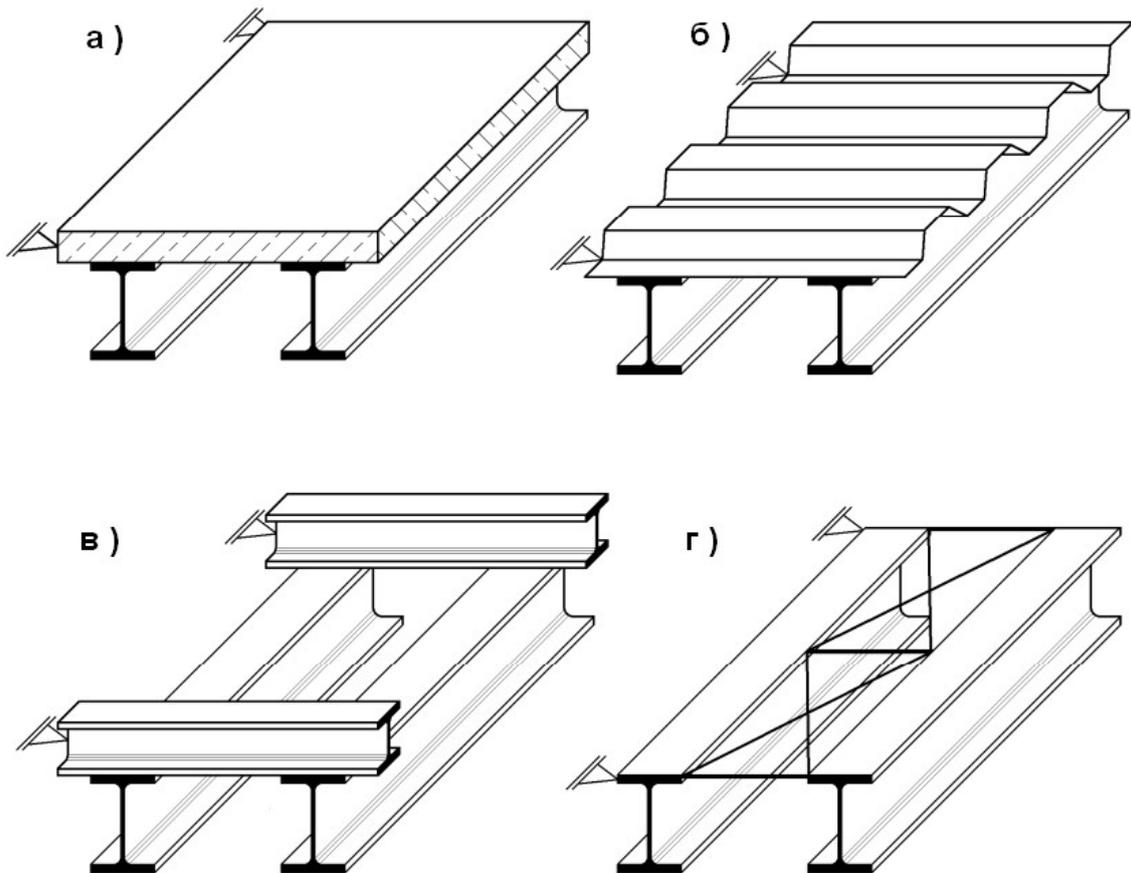


Рис. 1. Різновиди розкріплення сталевих балок за допомогою стабілізуючих конструкцій: а) залізобетонної плити; б) сталевого профільованого настилу; в) прогонів; г) хрестових в'язей

Схему розташування дискретних в'язей по довжині сталевих балок і умовний вигляд поперечного перерізу сталевих балок із позначенням зсувної (S) і крутильної (c_φ) жорсткостей дискретних в'язей зображено на рис. 2.

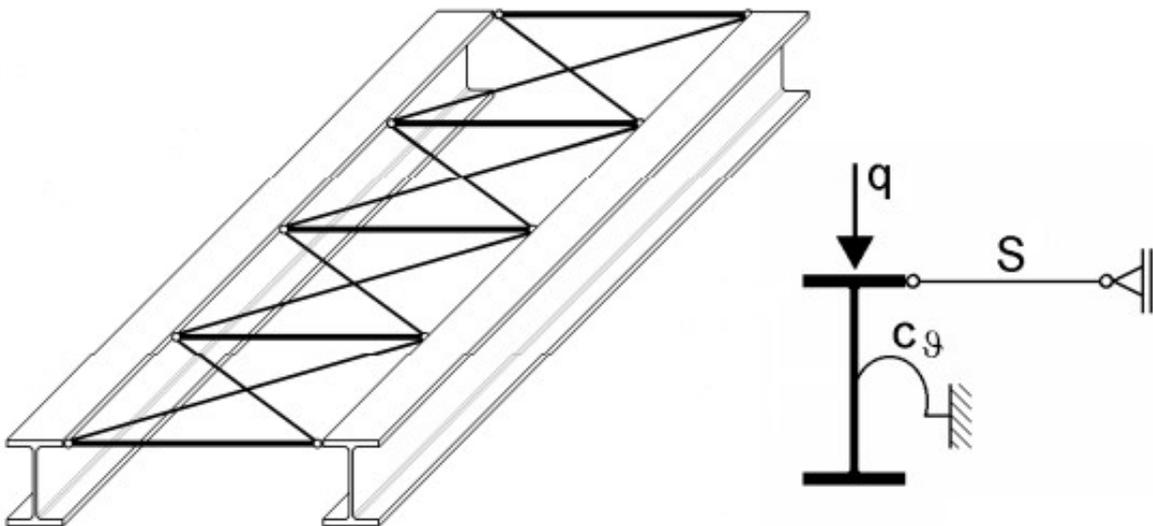


Рис. 2. Схеми розташування дискретних в'язей по довжині сталевих балок і умовний вигляд поперечного перерізу сталевих балок із позначенням зсувної (S) і крутильної (c_φ) жорсткостей дискретних в'язей

При закріпленні балок, які являють собою ригелі поперечної рами каркаса будівлі, дискретними в'язями (прогонами та хрестовими в'язями) зсувну жорсткість в'язей, що складаються з поперечних елементів (прогонів) і діагональних елементів (хрестових в'язей), може бути визначено згідно з роботою [5] за такою формулою

$$S_R = \frac{m}{n} \left(\frac{1}{EA_D \sin^2 \alpha \cos \alpha} + \frac{1}{EA_P \operatorname{ctg} \alpha} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де m – кількість хрестових в'язей по довжині каркаса будівлі;
 n – кількість об'єднаних у каркасі балок; при цьому дві крайні балки зараховуються як одна внаслідок того, що вони мають лише половину вантажної площі (кількість кроків балок);

A_D – площа поперечного перерізу діагонального елемента в'язей;

A_P – площа поперечного перерізу поперечного елемента в'язей;

α – кут нахилу діагонального елемента хрестових в'язей до балки (рис. 3).

У рівнянні (1) враховуються тільки розтягнуті діагональні елементи. Якщо проектом передбачено використання різних поперечних або діагональних елементів, то потрібно підставляти мінімальні площі поперечного перерізу. Рівняння (1) можна ще записати у вигляді

$$S_R = \frac{m}{n} \left(\frac{a^2 b E}{\left(\sqrt{a^2 + b^2} \right)^3 + \frac{a^3}{A_P}} \right), \quad (2)$$

де a – відстань між балками (рис. 3);

b – найбільша відстань між перехресними діагональними елементами одного відсіку в'язей по довжині балки (рис. 3).

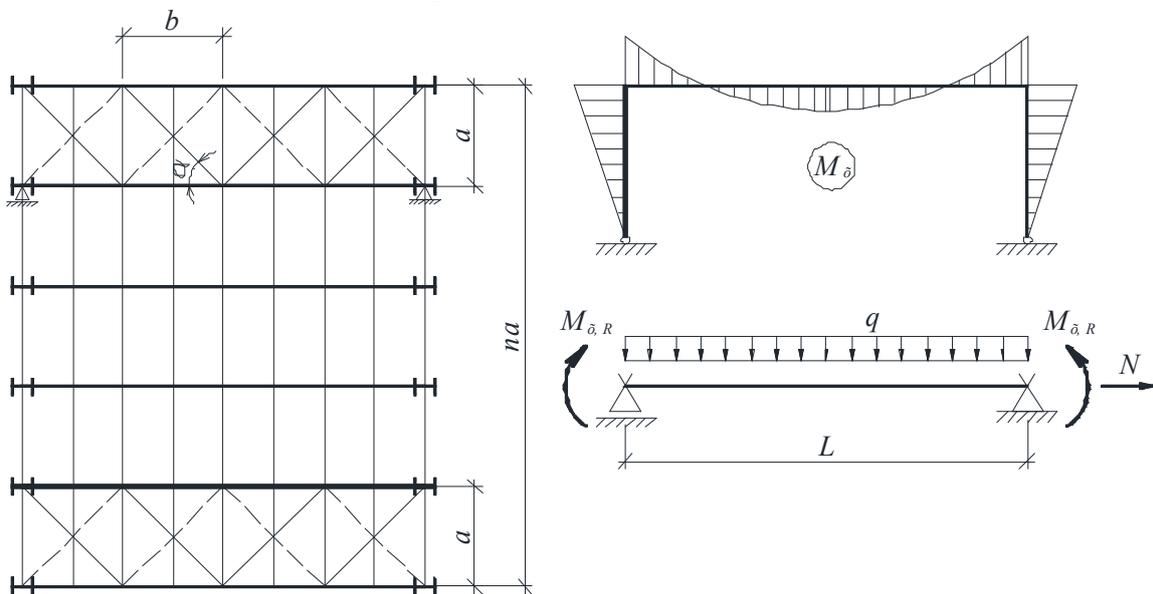


Рис. 3. Розрахункова схема розкріпленої в'язями балки, що слугує ригелем двохшарнірної поперечної рами

Закручування статично визначних балок не відбувається, якщо зсувної жорсткості в'язей достатньо для забезпечення повного закріплення стиснутого пояса балки від

поперечних зміщень. У всіх інших випадках необхідно перевіряти розрахунком достатню крутильну жорсткість прогонів за формулою [2, 3]

$$c_{g,k} \geq \frac{M_{pl,x,k}^2}{EI_y} k_g k_v, \text{ [кНм/м]}, \quad (3)$$

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 він дорівнює 4; при обмеженій – 0, в інших випадках визначається за табл. ВВ.1 [2] або табл. 6 [3];

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

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

Наявна крутильна жорсткість дискретних в'язей (прогонів) $c_{g,k}$ може бути інтерпретована як система пружин, що послідовно включаються в роботу, і визначена за умови прийняття жорсткого з'єднання балки та в'язей з рівняння

$$c_{g,k} = \left(\frac{1}{c_{gM,k}} + \frac{1}{c_{gP,k}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

де $c_{gM,k}$ – теоретична крутильна жорсткість, обумовлена погонною згинальною жорсткістю в'язей; визначається за формулою (5), в якій погонний момент інерції для дискретних в'язей I_a дорівнює відношенню моменту інерції до кроку в'язей;

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

Перша складова крутильної жорсткості $c_{gM,k}$ визначається за умови прийняття жорсткого з'єднання балки і прогонів із виразу [3]

$$c_{gM,k} = \frac{EI_a}{a} k, \quad (5)$$

де I_a – погонний момент інерції прогонів;

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

Крутильна жорсткість прогонів $c_{gP,k}$ отримується з рівняння [8]

$$c_{gP,k} = \frac{E}{4(1-\nu_{st}^2)} \frac{1}{\frac{h_s}{t_w^3} + 0,5 \frac{b_o}{t_o^3}}, \quad (6)$$

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

h_s – відстань між центрами ваги поясів закріпленої балки;

t_w – товщина стінки закріпленої балки;

b_o, t_o – ширина і товщина верхнього пояса закріпленої балки.

При застосуванні формули (6) 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.

Крутильна жорсткість прогонів $c_{gp,k}$ може також визначатися за формулою

$$c_{gp,k} = \frac{k_p + 1}{L} \sqrt{\frac{EG}{3} \frac{b_o}{h - t_f} (t_w t_f)^3}, \quad (7)$$

де k_p – кількість місць кріплення в'язей у прольоті балки (без опорних кріплень);

L – проліт балки;

G – модуль зсуву сталі;

h – висота балки;

t_f, t_w – товщини полицки і стінки балки.

Якщо крутильної жорсткості прогонів недостатньо для виключення закручування балки, то розрахунок за згинально-крутильною формою втрати стійкості балок повинен виконуватися зі зменшувальним коефіцієнтом для згинального моменту, який залежить від приведеної гнучкості. Але при двотаврових балках із симетричним відносно осі стінки перерізом, стиснутий пояс котрих утримується збоку нерухомо в окремих точках на відстані L_c , точніший розрахунок не потрібний, якщо виконується умова (6.59) [2]. Тобто стійкість плоскої форми згину елементів із дискретним бічним розкріпленням стиснутих полицок забезпечено, якщо забезпечено довжину L_c між розкріпленнями або результуюча гнучкість еквівалентної стиснутої полицки задовольняє умову (6.59) [2]. Аналогічні умови для умовної гнучкості стиснутого пояса балки 1-го класу містяться і в таблиці 1.5.1 [1]. Якщо порівняти максимальні кроки в'язей, при яких загальна стійкість балки вважається забезпеченою, за вітчизняними [1] і європейськими [2] нормами (див. табл. 1), то можна виявити, що за нормами [1] ці кроки в 1,75 – 2,06 разу більші, ніж за нормами [2], що свідчить про недостатнє обґрунтування і надійність цих значень за нормами [1].

Таблиця 1. Порівняння максимальних кроків в'язей за різними нормами

№ двотавра	$l_{ef,max}$ за нормами [1] при $R_y = 240$ МПа	$l_{ef,max}$ за нормами [1] при $R_y = 335$ МПа	$L_{c,max}$ за нормами [2] при $R_{yn}(f_y) = 245$ МПа	$L_{c,max}$ за нормами [2] при $R_{yn}(f_y) = 345$ МПа	$l_{ef,max} / L_{c,max}$ при $R_y = 240$ МПа	$l_{ef,max} / L_{c,max}$ при $R_y = 335$ МПа
1	2	3	4	5	6	7
20	1935	1638	942	794	2,05	2,06
22	2109	1785	1033	871	2,04	2,05
24	2180	1845	1079	909	2,02	2,03
27	2320	1963	1156	974	2,01	2,01
30	2464	2086	1225	1032	2,01	2,02
33	2518	2131	1270	1070	1,98	1,99
36	2576	2180	1316	1109	1,96	1,97
40	2711	2295	1379	1162	1,97	1,97
45	2730	2311	1407	1185	1,94	1,95
50	2858	2419	1470	1239	1,94	1,95
55	2994	2534	1543	1301	1,94	1,95
60	3131	2650	1612	1358	1,94	1,95

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7
20Б1	1938	1641	1015	856	1,91	1,92
23Б1	2081	1761	1124	948	1,85	1,86
26Б1	2197	1860	1197	1009	1,83	1,84
26Б2	2240	1896	1229	1036	1,82	1,83
30Б1	2512	2126	1389	1170	1,81	1,82
30Б2	2573	2178	1425	1201	1,81	1,81
35Б1	2679	2267	1489	1255	1,80	1,81
35Б2	2749	2327	1530	1289	1,80	1,81
40Б1	2821	2388	1557	1312	1,81	1,82
40Б2	2895	2451	1602	1350	1,81	1,81
45Б1	3073	2601	1707	1439	1,80	1,81
45Б2	3136	2654	1748	1473	1,79	1,80
50Б1	3427	2901	1894	1596	1,81	1,82
50Б2	3496	2959	1944	1638	1,80	1,81
55Б1	3754	3178	2099	1769	1,79	1,80
55Б2	3819	3232	2140	1803	1,78	1,79
60Б1	3922	3319	2199	1853	1,78	1,79
60Б2	3971	3361	2240	1888	1,77	1,78
70Б1	4320	3656	2395	2018	1,80	1,81
70Б2	4407	3730	2477	2087	1,78	1,79
80Б1	4581	3878	2522	2125	1,82	1,82
80Б2	4672	3954	2622	2210	1,78	1,79
90Б1	4846	4102	2650	2233	1,83	1,84
90Б2	4923	4167	2750	2317	1,79	1,80
100Б1	5148	4357	2850	2402	1,81	1,81
100Б2	5219	4418	2941	2478	1,77	1,78
100Б3	5268	4459	3009	2536	1,75	1,76
100Б4	5300	4486	3037	2559	1,75	1,75

Значення $L_{c,max}$ за нормативним документом [2] визначалися при максимальному завантаженні балки. Поправковий коефіцієнт k_c приймався таким, що дорівнює одиниці. Замість радіуса інерції еквівалентної стиснутої полицки $i_{f,z}$ підставлявся радіус інерції загального перерізу i_z .

При дискретному закріпленні двотаврової балки прогонами потрібно забезпечити їх сумісну роботу шляхом розрахунку з'єднувальних засобів (болтів) на розтяг і зсув. Розрахунок на розтяг відповідно до відомостей робіт [4, 8] може не виконуватися, якщо зосереджений контактний момент більший за зосереджений редукований приєднувальний момент між прогонами і балкою ($M_k > M_g$). Зосереджений зворотний крутний контактний момент, який виникає від зовнішнього навантаження і дорівнює крутному навантаженню при спиранні прогону на один край полицки двотаврової балки внаслідок її закручування, визначається за формулою

$$M_k = F_d \frac{b_o}{2}, \quad (8)$$

де F_d – зосереджена сила від прогону в місці дискретного закріплення балки.

Зосереджений редукований крутний приєднувальний момент дорівнюватиме

$$M_g = red m_g e_d, \quad (9)$$

де $red m_g$ – редукований крутний приєднувальний момент;

e_d – відстань між місцями дискретного закріплення балки.

Редукований крутний приєднувальний момент визначається за формулою

$$red m_g = m_g \frac{M_{x,Ed}}{M_{pl,x,Rd}}, \quad (10)$$

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

$$m_g = \frac{0,075}{\zeta^2} \frac{M_{pl,x,k}^2}{EI_y} = 0,015k_g \frac{M_{pl,x,k}^2}{EI_y}, \quad (11)$$

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

При кріпленні прогонів до балки зверху за допомогою двох болтів з кожної сторони верхнього пояса та наявності обмеженої осі обертання балки зусилля розтягу і зсуву, що припадають на один болт, дорівнюватимуть відповідно

$$F_t = \frac{M_g - M_k}{b_o + w_s}; \quad (12)$$

$$F_s = \frac{S\gamma_s e_d}{4a}, \quad (13)$$

де w_s – відстань між болтами по ширині пояса балки;

γ_s – кут ковзання (максимальне значення кута – $\gamma_s = 1/750$).

Потім потрібно порівняти розрахункову несучу здатність одного болта на розтяг і зсув із відповідним значенням зусилля.

Висновки. В'язі можуть не тільки виконувати свою безпосередню функцію, але й ефективно використовуватися для закріплення сталевих балок з метою уникнення 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. DIN 18 800 Teil 2: Stahlbauten – Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken, 1990. – 44 s.
4. 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.
5. Hamaekers K. Stahlbau, 11 Biegedrillknicken / K. Hamaekers. – TFH Berlin, 4/02, 33 s.
6. Kindmann R. Bemessung stabilisierender Verbände und Schubfelder / R. Kindmann, M. Krahwinkel // Stahlbau 70 (2001), S. 885 – 899.

7. Lindner J. Stabilisierung von Biegeträgern durch Drehbettung - eine Klarstellung / J. Lindner // *Stahlbau* 56 (1987), S. 365 – 373.
8. 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.