

УДК 624.014

д.т.н., професор Білик С.І., Склярів І.О.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ РАМНИХ КАРКАСІВ ЗМІННОГО ДВОТАВРОВОГО ПЕРЕРІЗУ З ГНУЧКОЮ СТІНКОЮ

Проведено аналіз існуючих методик розрахунку двотаврів з гнучкою стінкою при сумісній дії нормальних та дотичних напружень за нормами країн СНД та Європейськими нормами. На основі попередніх досліджень запропоновано розрахункову модель перерізу рамного елемента та формулу визначення граничного згинального моменту при урахуванні закритичної роботи гнучкої стінки. Відштовхуючись від робіт Папковича, Броуде, Тимошенко, Власова, Смірнова на основі енергетичного критерію для рамних елементів двотаврового перерізу змінної жорсткості з гнучкою стінкою встановлено умови міцності при сумісній дії згинального моменту, поперечної та повздовжньої сили.

Ключові слова: *рами змінної жорсткості, зварні двотаври, двотаври з гнучкою стінкою, розрахункові умови міцності, сталеві каркаси.*

Актуальність теми. На даний момент у галузі капітального будівництва України простежується тенденція до зростання обсягів використання металевих конструкцій. Причиною цього є низка переваг сталі як конструктивного матеріалу. До них можна віднести високу відносну міцність, що визначається як відношення розрахункового опору до середньої густини матеріалу – у звичайної будівельної сталі С245 цей показник складає 0,3; для порівняння – у звичайної деревини він $\approx 0,2$, у клеєної деревини $\approx 0,25$, а у залізобетоні взагалі не перевищує 0,1. Крім цього, застосування сталі для виготовлення несучих конструкцій зумовлює їх високу надійність через однорідність структури матеріалу, високий модуль пружності, непроникність для рідин і газів.

Але стрімке підвищення вартості енергетичних ресурсів диктує вимогу зменшення металомісткості продукції, підвищення ступеня індустріалізації виготовлення та спрощення процесу монтажу. В цьому відношенні вітчизняні сталеві конструкції України дещо програють зарубіжним. Тому на даний момент доля імпортних металоконструкцій на нашому ринку досягає 30%. У зв'язку з цим існує необхідність створення конструкцій, які дозволили б без принципового переоснащення українських заводів підвищити їх конкурентноспроможність і привабливість для інвесторів.



Рис.1.Монтаж сталевих конструкцій рамного каркаса зі зварних двотаврів змінного перерізу в Московській обл.

Достоїнною перспективою розвитку сучасних сталевих конструкцій є використання ефективних рамних каркасів комплексного постачання зі зварних двотаврів змінного перерізу. Такі конструкції, крім високої власної ефективності, забезпечують високу статичну та вібраційну міцність, дозволяють використовувати монтажні механізми невеликої вантажопідйомності і високої мобільності, а також відповідають вимогам збірно-розбірності будівель і споруд, що диктуються ринком (рис.1, 2).

Дослідженням роботи таких конструкцій присвячені роботи Дробязко Л.Є., Катюшина В.В., Трофімова В.І., Камінського А.М., Білика С.І. [1], Кириленко В.Ф. [2], Новінькова А.Г. [3], Глітіна О.Б. [4] та ін.

Найпростіший спосіб полегшення елементів рам зі зварних двотаврів змінного перерізу та підвищення їх ефективності – це використання більш тонкої стінки з умовною гнучкістю $\lambda w=6\dots 10$. Використання резерву несучої здатності, що полягає в урахуванні закритичної стадії роботи тонкої пластинки, дозволяє значно знизити вагу і вартість конструкцій.

При цьому витрати сталі зменшуються не тільки за рахунок зниження товщини стінки. Гнучкість стінки впливає на раціональну висоту перерізу – проведені в [5] дослідження дають змогу стверджувати, що при використанні тонкої стінки висота збільшується, а через це зменшується необхідна площа полиць двотавра і, відповідно, вага конструкції.



Рис.2. Будівництво логістичного центру у м. Обухів Київської обл.

Експериментальні випробування [6], [7] показали, що незважаючи на те, що стінка перерізу при досягненні навантаженнями своїх граничних розрахункових значень може частково виключатися з роботи, несуча здатність конструкції не вичерпується. До того ж за [8] згідно з імовірнісним трактуванням понять методу граничних станів та випадковим характером природних та технологічних процесів навантаження розглядають як випадкові функції часу – граничне розрахункове значення навантаження відповідає екстремальній ситуації, яка може виникнути не більше як один раз протягом терміну експлуатації. Тобто ситуація, за якої відбуватиметься часткове виключення стінки з роботи може виникнути один раз за період експлуатації. Крім того, велика гнучкість буде лише в перерізі з максимальною висотою, а частина стінки з меншою гнучкістю буде виконувати стабілізуючу дію, що також покращує роботу конструкції і зменшує ефект редукування перерізу.

Аналіз досліджень та основні результати. Проблемою розробки теорії розрахунку конструкцій двотаврового перерізу з гнучкою стінкою займалися такі вчені, як Броуде Б.М. [9], Ааре І.І. [10], Сімаков Ю.М. [11], Нілов О.О. [12] та ін. Методологічно для розрахунку тонкостінних шарнірно опертих балкових конструкцій у [13] на основі існуючої експериментальної та теоретичної бази було запропоновано виключати з роботи перерізу стиснуту частину стінки і в розрахунок несучої здатності елемента вводити поняття редукованого перерізу. Балка по довжині розбивається на умовні відсіки – для приопорних зон переважаючою є дія поперечної сили, посередині визначальним фактором є дія згинального моменту, частина ж балки працює на сумісну дію нормальних та дотичних напружень. Перевірку міцності тонкостінної двотаврової балки як з вертикальними ребрами жорсткості, так і без них, при згині рекомендується виконувати за формулою:

$$M_{пред} = kWR \leq M_p. \quad (1)$$

У цій формулі $M_{пред}$ – граничний згинальний момент, що може сприйматись перерізом; k – редуційний коефіцієнт, що враховує виключення стиснутої частини стінки при її роботі на згин в закритичній стадії; W – момент опору перерізу; R – розрахунковий опір сталі; M_p – максимальний розрахунковий момент в межах відсіку. Коефіцієнт k є напівемпіричним, його значення залежить від гнучкості стінки та відношення площі полиці до площі стінки і наведено в таблиці 1 [13].

При переважній дії перерізуючої сили для балок з вертикальними ребрами жорсткості вводиться формула перевірки міцності:

$$Q_{пред} = \tau_{кр} ht + 2ct\sigma_t \frac{1}{1 + \alpha^2} \leq Q_p. \quad (2)$$

Перший доданок враховує критичні напруження зсуву в перерізі, другий – утворення діагональної складки в межах приопорного відсіку балки.

Для безреберних балок з гнучкою стінкою перевірку міцності перерізу на дію поперечної сили слід застосовувати формулу:

$$Q_{пред} = \tau_{пред} ht \leq Q_p. \quad (3)$$

Причому тут $\tau_{пред}$ – граничне значення дотичних напружень, яке дорівнює
$$\tau_{пред} = \left(\frac{820 \cdot 10^4}{\lambda^2} + 360 \right) \sqrt{\frac{R}{2100}}.$$

Для випадку сумісної дії згинального моменту та поперечної сили в Рекомендаціях наведена формула:

$$M_{пред} = kW\sigma \leq M_p. \quad (4)$$

В (4) σ – нормальні напруження в стиснутому поясі балки:

$$\sigma = R \left(1,66 - \frac{0,12}{\beta} - \frac{\tau}{\tau_{пред}} \right). \quad (5)$$

Подальшого розвитку теорія розрахунку балкових конструкцій з гнучкою стінкою набула в [14]. Тут також враховується закритична робота стінки, а в розрахунок несучої здатності перерізу включається частина стінки висотою

За теоремою П.Ф. Папковича несуча здатність перерізу може бути оцінена за формулою $|M / M_u| + |Q / Q_u| \leq 1$; німецький стандарт DIN 18 800 [15] для тонких пластин при дії нормальних та дотичних напружень в перерізі рекомендує користуватись виразом $(\sigma / \sigma_u)^{1,25} + (\tau / \tau_u)^{1,25} \leq 1$; СНиП II-23-81* та Eurocode 3 [16] для обмеження місцевої стійкості стінки вводять складові у квадраті, тобто $(\sigma / \sigma_u)^2 + (\tau / \tau_u)^2 \leq 1$. Броуде в своїх працях рекомендує для випадків роботи двотаврового перерізу на сумісну дію нормальних та дотичних напружень застосовувати умову міцності:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_u}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_u}\right)^2 \left(\frac{\tau}{\tau_u}\right)^2 \leq 1. \quad (9)$$

Коеф. α для перерізів з умовною гнучкістю стінки $\lambda_w \leq 3,5$ дорівнює $\approx 0,65$, при $\lambda_w \geq 5,5$ $\alpha \approx 0,92$.

Що стосується розрахунку рамних конструкцій змінного двотаврового перерізу з гнучкою стінкою, то загальнодоступних прозорих даних чи рекомендацій з проектування цього типу конструкцій поки що не існує. Єдина можливість детального аналізу напружено-деформованого стану рам зі зварних двотаврів змінного перерізу з гнучкою стінкою для проектувальника – це створення скінченноелементної моделі конструкції. Але це трудомісткий і тривалий процес, що вимагає високої кваліфікації інженера, тож мета не завжди виправдовує засоби.

У зв'язку з цим постає актуальна задача – розробити методику, що дозволила б інженерам-проектувальникам без сумнівів впроваджувати у виробництво високоефективні рамні каркаси зі зварних двотаврів змінного перерізу з гнучкою стінкою. В [17] авторами запропонована розрахункова модель перерізу, у якій середня частина стінки не повністю виключається з роботи, а враховується, що частина стінки при втраті стійкості частково сприймає згинальний момент, поперечну силу і поздовжнє зусилля (рис.4).

Переріз також приймають симетричним і після втрати стійкості стінки. Проведені аналітичні та числові дослідження довели адекватність та достовірність такої моделі. Граничний згинальний момент в перерізі визначається дещо складніше, але враховує додаткову дію нормальних напружень від стискаючої сили:

$$M_u = R_y h_w^2 t_w \left(1 - \frac{N}{2N_u}\right) \left(\frac{A_f}{h_w t_w} + \frac{0,85\zeta}{\lambda_w}\right). \quad (10)$$

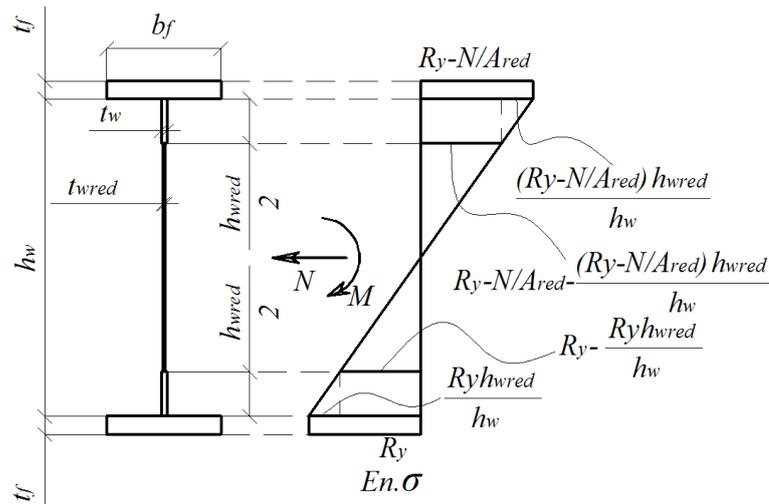


Рис.4. Розрахунковий переріз рами з гнучкою стінкою за урахування роботи стінки.
Епюра нормальних напружень в перерізі.

Рекомендується в рамних конструкціях двотаврового перерізу з гнучкою стінкою перевірку міцності виконувати за формулою $|N / N_u| + (M_x / M_u)^4 + (Q / Q_u)^4 \leq 1$.

Висновок. Працездатність рам і балок двотаврового перерізу з гнучкою стінкою при статичному навантаженні доведена теоретичними і експериментальними дослідженнями, але нормативної бази для розрахунку рамних елементів з гнучкою стінкою поки що не існує. Саме це є однією з провідних задач на даному етапі розвитку та впровадження рамних конструкцій змінного перерізу як раціональних сталевих каркасів малоенергоємних будівель. Розвиток цієї групи конструкцій дасть змогу звичайним заводам без надскладного обладнання створювати прості у виготовленні, надійні в експлуатації і ефективні за витратами сталі каркаси, які зроблять Україну для світового ринку імпортером не дешевого чорного металу, а високоякісного конкурентноспроможного продукту.

Література:

1. Білик С.І. Раціональні сталеві каркаси малоенергоємних будівель із двотаврів змінного перерізу // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук – К.: Науковий світ, 2008. – 20 с.
2. Кириленко В.Ф., Кляйман М.А. Расчёт напряжённого состояния клефанерных элементов переменного сечения // Строительные конструкции, материалы и технология их производства: Сб. научн. тр. / НПО «Белстройнаука» Госстроя БССР. – Минск, 1989 – с. 70-76.
3. Новиньков А.Г., Себешев В.Г. Устойчивость стенки в элементах рамных конструкций переменного по высоте двутаврового сечения // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. Вып. № 9, 1990 – с. 109-113.

4. Глігін О.Б. Оптимізація поперечних рам каркасів з елементами змінної жорсткості : Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : Спец. 05.23.01 – будівельні констукції, будівлі та споруди. – Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2008. - 20 с.
5. Склярів І.О., Білик С.І. Рациональна висота перерізу двотаврових рамних конструкцій змінної жорсткості з гнучкою стінкою // Сборник научных трудов «Современные строительные конструкции из металла и древесины» ОГАСА – Одесса, ООО«Внешрекламсервис», 2010 – с. 230-235.
6. Cheru C., Kunapongsiri V. Experiments on unstiffened thin web girders. *Welding Journal*, vol. 52, № 4, 1973
7. Симаков Ю.Н. Экспериментальные исследования двутавровых балок с гибкими неподкрепленными стенками. "Прикладные и теоретические исследования строительных конструкций". Труды института. ЦНИИСК им. Кучеренко. М.: 1981.
8. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування // ВАТ «Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського», Донбаська Державна академія будівництва та архітектури, Полтавський Національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Науково-виробниче товариство СКАД СОФТ. – К.: Міністерство України, 2006. – 60 с.
9. Броуде Б.М. "О закритическом поведении гибких стенок.// "Строительная механика и расчет сооружений", №1 1975 – с. 54-56.
10. Ааре И.И. Расчёт и проектирование тонкостенных металлических балок // Сб.научн.тр. / Таллинский политехн.ин-т. Сер.А. - 1968. - N 259. –с. 39-58.
11. Симаков Ю.Н. Исследования сварных балок с гибкими неподкрепленными стенками. "Новые конструктивные решения строительных металлических конструкций". Сборник научных трудов. ЦНИИСК им.Кучеренко. М., 1983.
12. Нілов О.О. Металеві конструкції. Балки. Колони: Навч. пос. для студентів будівельних спеціальностей. – К.: ІЗМН, 1997, 232 с.
13. Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок (к СНиП II-В.3-72) // ЦНИИПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ им. Мельникова – М.: 1977. 28 с.
14. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) ЦИТП Госстроя СССР М.: 1989. -148 с.

15. DIN 18800-4 Structural steelwork; analysis of safety against buckling of shells // Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard) / 01-Nov-1990 – 23 pages.

16. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.3: General rules – Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting // European Committee for Standardization (CEN), 22 August 2001 – 128 pages.

17. Білик С.І., Склярів І.О. Раціональні рамні каркаси постійного та змінного двотаврового перерізу з підвищеною гнучкістю стінки // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – Випуск 5, 2010 р.–с. 199-209.

Аннотація.

Проведен аналіз існуючих методик розрахунку двотавров з гнучкою стінкою при спільному діянні нормальних і касательних напружень по нормам країн СНГ і Європейським нормам. На основі попередніх досліджень запропонована розрахункова модель сечення рамного елемента і формула визначення граничного згинаючого моменту з урахуванням закритичної роботи гнучкої стінки. Відсилаючись на роботи Папковича, Бруде, Тимошенко, Власова, Смирнова на основі енергетичного критерію для рамних елементів двотаврового сечення змінної жорсткості з гнучкою стінкою встановлені умови міцності при спільному діянні згинаючого моменту, поперечної і продольної сили.

Abstract.

An analysis of existing methods for calculating I-beams with a flexible wall under the combined effect of normal and shear stress on the standards of the CIS countries and European norms made. Based on preliminary investigations suggested computational model of the cross section of frame element and a formula to determine the maximum bending moment, taking into account the super-critical of the flexible wall. Starting from the works Papkovich, Broude, Timoshenko, Vlasov, Smirnov etc. based on the energy criterion for frame elements of I-section of variable stiffness with a flexible wall mounted terms of strength under the combined action of bending moment, shear and longitudinal force.