

УДК 624.014

к.т.н., доцент Склярів І.О.,
Київський національний університет будівництва і архітектури**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ
СТАЛЕВИХ РАМ ЗІ ЗВАРНИХ ДВОТАВРІВ ЗМІННОГО ПЕРЕРІЗУ З
ГНУЧКОЮ СТІНКОЮ**

Розглянуто питання розрахунку тонкостінних рамних конструкцій зі зварних двотаврів на основі теоретичних досліджень та проведення експериментальних випробувань елементів рам змінної жорсткості. Наведено основні розрахункові положення для проектування легких сталевих рам зі змінною висотою перерізу.

Ключові слова: рамні каркаси, змінний переріз, зварні двотаври, двотаври з гнучкою стінкою.

Дослідження в області металобудування зазвичай присвячуються пошуку нових технічних рішень будівель і споруд з упором на зменшення вартості матеріалів. При цьому ефективність конструкції може досягатись вибором вигідної статичної схеми каркасу та раціональних розподілом матеріалу по довжині елементів. Найбільш раціональною конструктивною формою несучого каркасу з точки зору розподілу внутрішніх зусиль є портална рама із жорстким поєднанням колон та ригелів. Сталеві порталні рами на даний момент є одними з найбільш розповсюджених проектних рішень для несучих каркасів одноповерхових будівель прольотом від 18-20 м. Такі рами можуть бути виконані як із елементів суцільного перерізу, так і з решітчастих конструкцій.

Незважаючи на широке розповсюдження решітчастих конструкцій, вони не відповідають сучасним вимогам щодо технологічності, адже їх виробництво не відповідає рівню автоматизації галузі. Будь-яка решітчаста конструкція складається з великої кількості відправних одиниць. Кожен елемент на заводі проходить кілька стадій обробки: правка, маркування, механічна та газова різка, виконання отворів, фрезерування та ін. При виготовленні конструкцій окремі деталі проходять до кілометру шляху на заводі від однієї ділянки до іншої. Механізація та автоматизація виробничого процесу, впроваджена на таких заводах, значно полегшує людську працю, але майже не впливає на загальну швидкість виготовлення конструкції. І, як наслідок, тривалість виробництва кінцевого продукту практично не зменшується.

Тому для заводського виробництва більш раціональними є конструкції з суцільними перерізами, виготовленими листової сталі. Витрати на виробництво при цьому можуть бути зменшені у 1.5-2 рази.

Досвід проектування сталевих рам показав, що використання елементів змінного перерізу забезпечує більш економічні рішення в порівнянні з елементами постійного перерізу.

Принцип проектування елементів рам змінного перерізу базується на раціональному розподілі матеріалу відповідно до схем згинальних моментів, а також на розвантажувальному ефекті, викликаному зміщенням центра ваги перерізів.

Найпростіший спосіб полегшення елементів рам зі зварних двотаврів змінного перерізу і підвищення їх ефективності – це використання тонкої стінки з умовною гнучкістю $\lambda w = 6 \dots 10$. Використання зварних двотаврів змінного перерізу з гнучкою стінками дозволяє отримати найкращий розподіл сталі між стінкою та полицями [1] при забезпеченні умов міцності та стійкості.

Особливості роботи тонкостінних двотаврів викликані нелінійною поведінкою гнучкої пластини у за критичній стадії роботи, тобто після втрати місцевої стійкості. При цьому несуча здатність конструкції в цілому зберігається, система переходить до нового стійкого стану рівноваги. Використання цього резерву несучої здатності, який полягає в урахуванні закритичної стадії роботи гнучкої стінки, дозволяє значно зменшити вартість конструкцій.

Систематичному дослідженню поведінки пластин після втрати стійкості у складеному перерізі чи окремо при різних граничних умовах присвячено роботи вчених Феппля, Кармана, Бубнова, Вагнера, Ромашевського, Баслера, Тюрлімана та ін. [2-7].

Але враховуючи складність аналітичної формалізації роботи тонкостінних двотаврів у складі рамних конструкцій, що пов'язана з нелінійною поведінкою конструкції після місцевої втрати стійкості стінки перерізу, перерозподілом внутрішніх напружень і розвитком пружно-пластичних деформацій у полицях перерізу, а також неминучою наявністю початкових недосконалостей стінки, яких при малій товщині та значній гнучкості майже неможливо уникнути, найпростішим шляхом дослідження цього питання є проведення натурального експерименту та розробка наближеної методики розрахунку таких конструкцій.

З метою запланованого дослідження розроблено конструкцію експериментальної установки у вигляді консольно защемленої стійки, навантаженої зосередженим навантаженням на вільному кінці, від дії якої в опорному вузлі виникає одночасно поздовжнє зусилля, перерізуєча сила та згинальний момент. Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

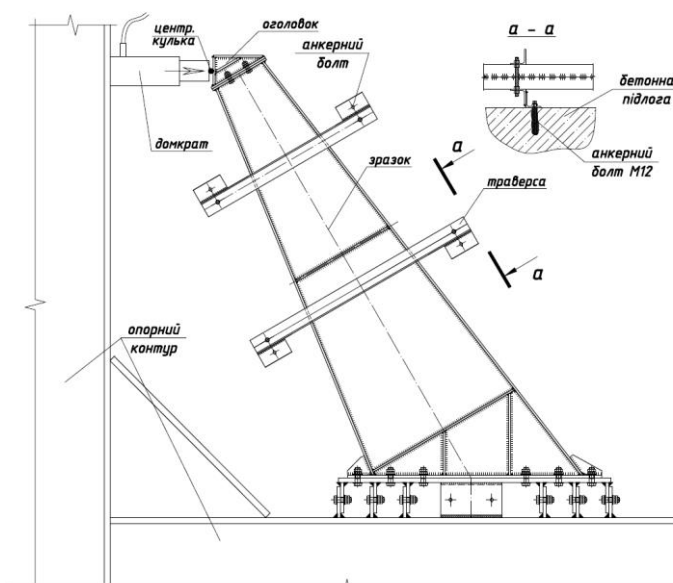


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Конструкцію розміщено в горизонтальній площині. Умовна гнучкість стінки у перерізі з максимальною висотою складає 10,7. Передача навантаження виконувалась в 11 стадій зі збільшенням зусилля у домкраті на кожній стадії на 10 кН з фіксацією показників вимірювальних приладів на кожній стадії.

Для прогнозування результатів експериментальних випробувань та попереднього аналізу роботи конструкції було розроблено чисельну модель зразка. Дослідження реалізовано в середовищі програмного комплексу Лира 9.6. Моделювання виконувалось плоскими оболонковими скінченими елементами. Розрахунок виконано в лінійній та нелінійній постановці. За результатами чисельного експерименту отримано значення напружень в розрахункових перерізах, форми втрати стійкості стінки та загальні переміщення системи (рис. 2).

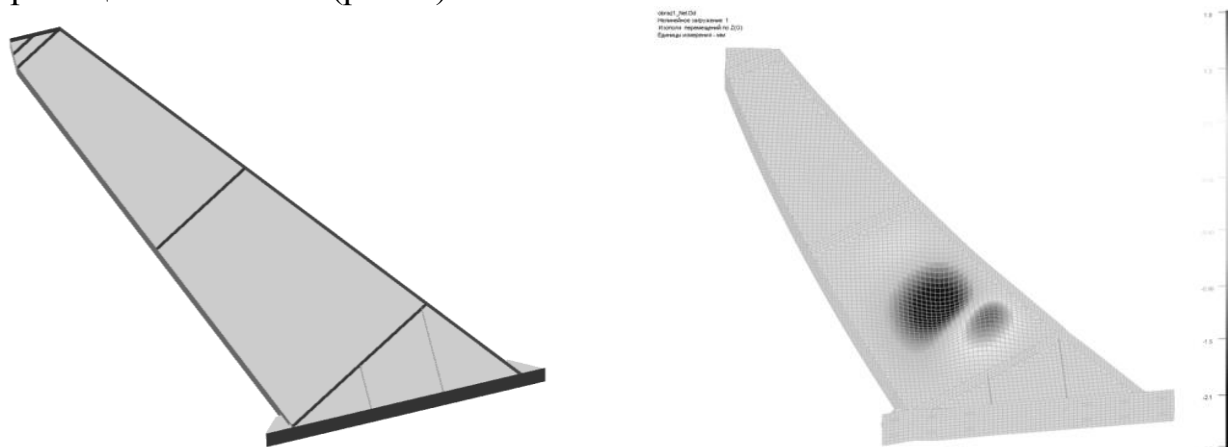


Рис. 2. Чисельна модель та деформована схема установки у середовищі програмного комплексу «Лира»

Фіброві деформації в поперечних перерізах вимірюються методом електротензометрії. Показники деформацій стінки також фіксувались на кожній стадії за допомогою штативу з індикаторами типу ИЧ-10 (рис. 3).



Рис. 3. Загальний вигляд експериментальної установки

В результаті проведення експерименту було встановлено параметри деформування конструкції, визначено характер втрати стійкості стінки та вичерпування несучої здатності перерізів.

Проведення експериментальних випробувань показало, що робота тонкостінних двотаврових рамних елементів принципово відрізняється від роботи елементів зі стійкими стінками. В конструкціях із тонкостінних двотаврів, внаслідок підвищеної деформативності стінки та її неминучих початкових недосконалостей, випучування починалось майже одразу з прикладенням зовнішнього навантаження. Зі збільшенням навантаження бічні прогини стінки набували характерного вигляду, що визначалось напруженим станом окремих ділянок.

Початкові прогини стінки визначають напрями бічного випучування. Незважаючи на значні прогини стінок при навантаженні, які досягали 4-5 t_w , робота рамних елементів в цілому мала пружний характер аж до граничних навантажень. Залишкові деформації в стінці на проміжних етапах завантаження не перевищували її товщини.

Встановлено, що в закритичній стадії роботи гнучкої стінки у полицях перерізу виникають додаткові напруження від дії місцевих згинальних моментів. Згинальний момент у стиснутій полиці виникає внаслідок деформацій стінки та «просідання» полиці, яка працює як балка на пружній основі зі змінними коефіцієнтами постелі (залежно від характеру деформування

стілки). Таким чином, максимальні нормальні напруження у стиснутому поясі рами з гнучкою стінкою можуть бути визначені за формулою:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{N}{A_{red}} + \frac{M}{W_{red}} + \frac{M_{f\bar{n}}k_c}{I_{fc}} \sigma_0 \leq R_y \gamma_c, \text{ де} \quad (1)$$

N , M – стискаюче зусилля та згинальний момент від дії зовнішніх навантажень; A_{red} , W_{red} – площа та момент опору послабленого двотаврового перерізу з гнучкою стінкою; M_{fc} – додатковий згинальний момент, який виникає у поясі після втрати стійкості стінки; I_{fc} – момент інерції таврового перерізу, утвореного стиснутою полицею та частиною стінки висотою h_{wred} ;

y_0 – відстань від центра ваги таврового перерізу стиснутого поясу до грані поясу; k_c – коефіцієнт, що враховує перерозподіл довантажуючого згинального моменту та залежить від гнучкості стінки:

$$k_c = 1 \quad \text{для перерізів, у яких } \bar{\lambda}_w > 9;$$

$$k_{\bar{n}} = \bar{\lambda}_w / \bar{\lambda}_{wu} \quad \text{для перерізів, у яких } \bar{\lambda}_w \leq 9.$$

Аналіз результатів показав непридатність існуючих методик для розрахунку рамних елементів з гнучкою стінкою. Розходження теоретичних та експериментальних результатів за існуючими методиками складає до 30%, у той час як за формулою 1 різниця складає менше 3%.

Враховуючи загальний підхід за будівельними нормами для елементів рам з відносним ексцентриситетом $m_x \geq 15$, на основі власних експериментальних досліджень, встановлено розрахункову умову міцності рамних елементів з гнучкою стінкою при сумісній дії поздовжнього, поперечного зусилля та згинальних моментів:

$$\left| \frac{N}{N_u} \right| + \left(\frac{M_x}{M_{u\varphi}} \right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_u} \right)^4 \leq \gamma_c. \quad (2)$$

У наведених формулах граничне значення згинального моменту позначено через: $M_{u\varphi} = R_y (1 - \frac{\alpha}{2}) W_{xred}$; граничне значення стискаючої сили: $N_u = \varphi A_{red} R_y$. Коефіцієнт умов роботи γ_c , враховуючи складний напружено-деформований стан елементів сталевих рам змінної жорсткості з гнучкою стінкою, слід обмежити значенням 0,95.

Загальні висновки. Проведені дослідження показали, що робота тонкостінних рамних конструкцій зі зварних двотаврів змінного перерізу принципово відрізняється від роботи конструкцій з суцільною стінкою. На основі власних теоретичних та експериментальних досліджень розроблено

розрахункову умову міцності рамних елементів при сумісній дії поздовжнього, поперечного зусилля та згинальних моментів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. 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 №14 – Ч. 1. – Одеса, ООО «Внешрекламсервис», 2010. – С. 230-235.
2. Фепплъ А. Сила и деформация : прикладная теория упругости. Т. 2 / А. Фепплъ, Л. Фепплъ – М.-Л. : Главная редакция общетехнической литературы и номографии, 1938. – 408 с
3. Karman. Th. The strength of thin plates in compression / Th. Karman, E. E. Sechler, L. H. Donnell // Transaction of the ASME. Vol. 54 – New York : ASME, 1932. – P. 53-57.
4. Бубнов И. Г. Труды по теории пластин / Бубнов И. Г. – М. : Гостехиздат, 1953. – 423 с.
5. Вагнер Г. В. Балки с весьма тонкой стенкой / Г. В. Вагнер // Сборник переводов ЦАГИ / под редакцией Уманского А. А. и Знаменского П. М. – М. : ЦАГИ, 1937. – С. 58-117.
6. Ромашевский А. Ю. Исследование работы балочных систем с тонкой стенкой с параллельными поясами / А. Ю Ромашевский // Труды ЦАГИ. Вып. 206. – М. : 1935. – С. 5-53.
7. Basler K. Strength of plate girders in bending / K. Basler, B. Thurlimann // Proc. of American Society of Civil Engineers. Vol. 87, №. ST 6 – 1961. – P. 153-181.

Аннотация.

Статья посвящена вопросу расчета тонкостенных рамных конструкций из сварных двутавров на основе теоретических исследований и проведения экспериментальных испытаний элементов рам переменной жесткости. Приведены основные расчетные положения для проектирования легких стальных рам с переменной высотой сечения.

Abstract.

Article is devoted to the calculation of frame structures with thin-walled welded Double T beams based on theoretical studies and experimental tests of elements of variable frame rigidity. Been given the main calculation position for the design of light steel frames with variable height section.