

УДК 624.014

Реалізація принципу концентрації матеріалу на прикладі проектування рамних конструкцій змінного перерізу з двотаврів із гнучкою стінкою

Склярів І.О., Білик С.І. д.т.н.

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

Анотація. Стаття присвячена аналізу ефективності сталевих рамних каркасів зі зварних двотаврів змінної жорсткості. Доведено, що в даному типі конструкцій матеріал максимально ефективно розподіляється по довжині елемента за рахунок змінної висоти стінки і по висоті перерізу за рахунок використання стінки з гнучкістю 180-350 – пояси сприймають згинальний момент, а стінка працює на дію поперечної сили. Крім того, в двотаврах із гнучкою стінкою, на відміну від традиційних двотаврів, дотичні напруження розподілені майже рівномірно по висоті перерізу відповідно до формули Журавського, тож дана конструктивна форма раціонально сприймає як окремо нормальні та дотичні напруження, так і їх комбінації. При цьому даний тип конструкцій забезпечує максимальну простоту та швидкість виготовлення і мінімальні витрати матеріалу, що в сучасних умовах загострення конкурентної боротьби між виробниками і підвищення вартості енергетичних ресурсів є необхідною умовою розвитку вітчизняного будівельного виробництва.

Аннотация. Статья посвящена анализу эффективности стальных рамных каркасов из сварных двутавров переменной жесткости. Доказано, что в данном типе конструкций материал максимально эффективно распределяется по длине элемента за счет переменной высоты стенки и по высоте сечения за счет использования стенки с гибкостью 180-350 – пояса воспринимают изгибающий момент, а стенка работает на действие поперечной силы. Кроме того, в двутаврах с гибкой стенкой, в отличие от традиционных двутавров, касательные напряжения распределены почти равномерно по высоте сечения согласно формуле Журавского, поэтому данная конструктивная форма рационально воспринимает как отдельно нормальные и касательные напряжения, так и их комбинации. При этом данный тип конструкций обеспечивает максимальную простоту и скорость изготовления и минимальные затраты материала, что в современных условиях обострения конкурентной борьбы между производителями и повышения стоимости энергетических ресурсов является необходимым условием развития отечественного строительного производства.

Abstract. The article analyzes the effectiveness of the steel frame skeletons of welded double-T's of variable stiffness. It is proved that in this type of construction the material is distributed most effectively over the length of the element at the expense of variable wall's height and over the vertical sections – through the use of a wall with the flexibility of 180-350 - belts perceive the bending moment, and the wall runs to the effect of shear force. In addition, the double-T's with a flexible wall, in contrast to the traditional double-T's, shear stresses distributed almost uniformly in height of the section according to the Zhuravskiy's formula, so this form of construction rationally perceives both separate normal and tangential stresses, and combinations thereof. Moreover, this type of construction ensures maximum ease and speed of

manufacturing, as well as the minimum cost of material, which in modern conditions of increasing competition between manufacturers and at higher cost of energy resources is a necessary condition for development of domestic construction production.

Ключові слова: концентрація матеріалу, рамні конструкції змінного перерізу, зварні двотаври змінної жорсткості.

Актуальність проблеми. Сучасні умови, які склалися на ринку будівельних конструкцій України, зумовили поступовий перехід від масового і типового будівництва до розробки індивідуальних проектів із забезпеченням максимальної економії матеріальних витрат та енергетичних ресурсів. Це викликано загальними тенденціями сучасної економіки і жорсткою конкурентною боротьбою між виробниками на ринку будівельних конструкцій. На даний момент ринок переживає певний період застою, але очікується поживлення паралельно з виходом економіки з кризового стану. І в цей період постає природне питання: а в якому ж напрямку буде розвиватися ринок легких металевих конструкцій? Сьогодні найбільш достойною перспективою, з точки зору ефективності, технологічності виготовлення, простоти з'єднання та монтажу, є рамні каркаси універсального призначення зі зварних двотаврів змінного перерізу з гнучкою стінкою.

Огляд досліджень. Ефективність двотаврових перерізів багато в чому залежить від співвідношення площ полиць та стінки: чим вище це співвідношення, тим ефективніше переріз. За певних співвідношень між висотою стінки та її товщиною під дією зовнішніх навантажень вона втрачає стійкість, що, до недавнього часу, було перешкодою для подальшого зменшення товщини стінки [1]. Інтерес до роботи конструкцій після втрати стійкості деяких їхніх елементів (закритична стадія роботи), проявлявся вченими та інженерами досить давно, зокрема, по відношенню до тонких пластин, що входять до складу корабельних або авіаційних конструкцій. У роботах Т. Кармана, С. Леві, П. А. Соколова, П. Ф. Папковича, І. Г. Бубнова, С. П. Тимошенко, А. С. Вольміра [2–7] та інших були розроблені методики з визначення навантажень, які може витримати підкріплена пластинка після втрати стійкості. При цьому було введено поняття редуційних коефіцієнтів, тобто коефіцієнтів включення тонкої пластини в сприйняття стискаючих зусиль. Одним із перших дослідників, які вивчали роботу конструкцій зі стінками, що працюють в глибокій закритичній стадії при дії дотичних напружень, були Т. Карман і Г. Вагнер У роботі [8] Вагнера вперше була використана розроблена ним теорія діагонального поля розтягу, що виникає в глибоко закритичній роботі пластин на зсув. Досить повний огляд досліджень щодо роботи стиснутих пластин після втрати стійкості наведено в роботах Ф. Блейха, Л. Я. Резницького і особливо А. С. Вольміра [6]. В результаті цих та

інших, більш сучасних, досліджень було встановлено, що конструкції, що мають у своєму складі тонкі пластини, підкріплені відносно жорсткими ребрами, можуть сприймати зовнішні навантаження набагато більші, ніж навантаження, визначені за умови втрати стійкості пластин, що входять до складу цих конструкцій. Таким чином, використання закритичної роботи пластинок дозволяє істотно зменшити їх товщину, а отже і масу всієї конструкції.

Постановка задачі. Зменшення товщини стінки двотаврового перерізу дає можливість більш раціонально розподілити матеріал у рамних конструкціях відповідно до розподілу внутрішніх напружень. Зосередження більшої кількості сталі в зоні максимальних напружень підпадає під визначення принципу концентрації матеріалу. В рамних каркасах змінного перерізу реалізація принципу концентрації матеріалу проявляється в кількох напрямках.

По-перше, за рахунок введення стінки змінної висоти можна раціонально розподілити матеріал конструкції по довжині елемента, тобто забезпечити максимальне наближення епюри діючих зусиль (для переважної більшості безкранових будівель із рамним каркасом найбільш впливовою є дія згинальних моментів) до епюри матеріалу (рис. 1). Природно, що закон зміни згинальних моментів описується квадратичною функцією, а закон зміни маси елемента по довжині – лінійною, тож ці функції мають тільки окремі точки дотику і не є паралельними, але це викликано оптимальною технологією формоутворення рамних елементів зі зварних двотаврів змінного перерізу (див. рис. 1) – стінку виготовляють шляхом розрізання листа металу по діагональній прямій лінії.

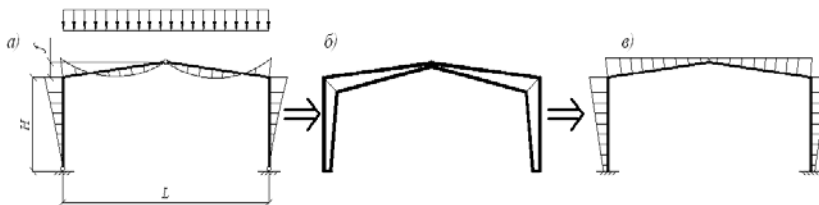


Рис. 1. Розрахункова схема (а), конструкція (б) та епюра матеріалу (в) рами змінного перерізу

До того ж, функція площі перерізу не є визначальною при формоутворенні – згинальному моменту в перерізі протидіє внутрішній момент опору, що для двотаврових перерізів є квадратичною функцією висоти. Тож для раціонального розподілу матеріалу з умови забезпечення міцності перерізу

в будь-якій точці по довжині елемента необхідно використовувати стінку двотаврового перерізу змінної за лінійним законом висотою.

По-друге, в елементах двотаврового перерізу з гнучкою стінкою матеріал концентрується в крайніх точках перерізу, де виникають максимальні нормальні напруження. Тож така конструктивна форма, як двотавр з гнучкою стінкою, максимально наближається до моделі ідеального двотавра, в якому полиці сприймають згинальний момент, а стінка – перерізує силу.

Викладання основного матеріалу. Як відомо, частка згинального моменту, що сприймається стінкою двотаврового перерізу, залежить від відношення моменту інерції стінки до моменту інерції перерізу в цілому:

$$M_w = M \frac{I_w}{I}$$

При цьому стінка згинальний момент сприймає неефективно – як видно з рис. 2, середня частина перерізу майже не працює. Власне, таким чином і виникла ідея створення двотаврового перерізу і були розроблені відповідні сортаменти металопрокату. Але в прокатні двотаври через універсальність їх використання (як в балках, так і в наскрізних колонах, фермах та ін.) було закладено значні запаси місцевої стійкості стінки, тож доля стінки в перерізі є значною, і при сучасних підходах до індивідуального проектування та підвищення вартості матеріальних ресурсів використання їх не завжди є виправданим. До того ж, при дії нормальних напружень стінка тонкостінного двотавра втрачає стійкість, а в роботу включається лише її частина висотою $h_{wred} = 0,85t_w \sqrt{E / R_y}$ в стиснутій зоні й вдвічі більше в розтягнутій [9, 10].

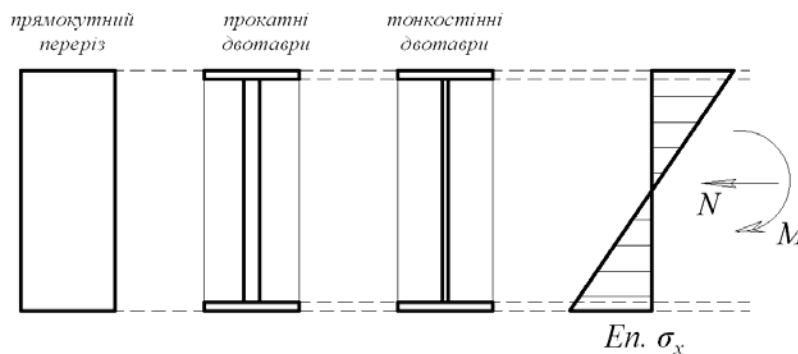


Рис. 2. Нормальні напруження в перерізі рамних елементів

По-третє, в елементах двотаврового перерізу, відповідно до формули Журавського, дотичні напруження розподіляються нерівномірно по висоті перерізу. Ця нерівномірність, зображена на рис. 3, визначається приведеним коефіцієнтом нерівномірності зсувів у межах стінки двотаврового перерізу K_g . Згідно з [11] цей коефіцієнт можна визначити з умови рівності роботи поперечної сили Q , прикладеної до центру ваги перерізу, сумі робіт окремих тангенціальних сил τ , розподілених по всій висоті перерізу. Для прямокутного перерізу:

$$K_g = \frac{A}{2^2} \int_A \frac{S_x^2}{t^2} dA = 1,2,$$

де A – площа перерізу, I_x – момент інерції перерізу, S_x – статичний момент перерізу, t – товщина перерізу в напрямі, перпендикулярному до напрямку зсуву.

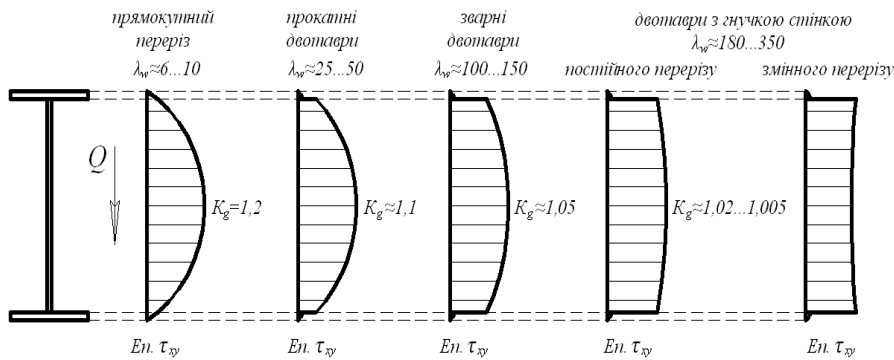


Рис. 3. Нерівномірність розподілу дотичних напружень у перерізах

Для двотаврового перерізу значення коефіцієнта K_g дещо змінюється і залежить від відношення площі перерізу стінки до площі перерізу в цілому:

$$K_g = \frac{A}{2^2} \left(\frac{A}{A_w} \right) \int_A \frac{S_x^2}{t^2} dA.$$

Для тонкостінних двотаврових перерізів значення приведенного коефіцієнту зсуву перерізу наближається до одиниці (див. рис. 3).

Тож і дотичні напруження елементи з гнучкою стінкою сприймають більш ефективно, ніж традиційні двотаври – напруження розподіляються рівномірно по висоті перерізу.

В перерізах рамних елементів дуже часто одночасно виникають поздовжня, поперечні сили і згинальний момент – особливо це стосується жорстких карнизних вузлів. Проведені авторами [9] дослідження показали, що при сумісній дії нормальних та дотичних силових факторів перевірку працездатності перерізу необхідно виконувати за наступною формулою:

$$\frac{N}{N_u} + \left(\frac{M}{M_u}\right)^4 + \left(\frac{Q}{Q_u}\right)^4 \leq 1.$$

На рис. 4 проілюстровано, наскільки ефективно сприймають сумісну дію нормальних та дотичних напружень різні перерізи. По горизонталі відкладаємо відношення нормальних напружень у перерізі до граничного значення, по вертикалі – відповідно дотичних напружень у перерізі до граничного значення. Ефективність перерізу визначається ступенем наближення до правого верхнього кута, де елемент сприймає нормальні та дотичні напруження незалежно одне від одного – так, як це відбувається в стрижневих конструкціях: пояси сприймають згинальний момент, а решітка – поперечну силу.

Як видно з рис. 4, ефективність двотаврового перерізу можна проілюструвати кривою – чим більш випукла крива, тим ефективнішим є переріз. За теоремою П. Ф. Папковича несуча здатність перерізу може бути оцінена за формулою $|M/M_u| + |Q/Q_u| \leq 1$. На рис. 4 це проілюстровано нижньою прямою. Німецький стандарт DIN 18 800 [12] для тонких пластин при дії нормальних та дотичних напружень у перерізі рекомендує користуватися виразом $(\sigma/\sigma_u)^{1,25} + (\tau/\tau_u)^{1,25} \leq 1$ (перша крива на рисунку 4). СНиП II-23-81* та Eurocode 3 [13] для обмеження місцевої стійкості стінки вводять складові напружень у квадраті, тобто $(\sigma/\sigma_u)^2 + (\tau/\tau_u)^2 \leq 1$ (друга крива на рисунку 4). Броуде в своїх працях рекомендує для випадків роботи двотаврового перерізу на сумісну дію нормальних та дотичних напружень застосовувати умову міцності: $(\sigma/\sigma_u)^2 + (\tau/\tau_u)^2 + \alpha(\sigma/\sigma_u)(\tau/\tau_u) \leq 1$. Коеф. α для перерізів із умовною гнучкістю стінки $\lambda_w \leq 3,5$ дорівнює $\approx 0,65$, при $\lambda_w \geq 5,5$ $\alpha \approx 0,92$. Тобто максимально ефективним є переріз зі значенням умовної гнучкості більше 5,5. Формула СНиП II-23-81* для двотаврів із гнучкою

конкурентної боротьби між виробниками та підвищення вартості енергетичних ресурсів є необхідною умовою розвитку вітчизняного будівельного виробництва.

Література

- [1] Склярів І. О. Питання розрахунку тонкостінних двотаврів у історичному аспекті / І. О. Склярів // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди / Зб. наук. пр. – Рівне : НУВГП, 2011. – Випуск 21.
- [2] 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.
- [3] Папкович П. Ф. К вопросу о выпучивании плоских пластин, сжимаемых усилиями, превосходящими их Эйлерову нагрузку / П. Ф. Папкович // Морской сборник. – М. : 1920. – № 3. – С. 8–9.
- [4] Соколов П. А. О напряжениях в сжатой пластинке после потери устойчивости / П. А. Соколов // Сборник «Труды НИИС». – Нижний Новгород : 1932. – Вып 7. – С. 11–56.
- [5] Бубнов И. Г. Труды по теории пластин / И. Г. Бубнов – М. : Гостехиздат, 1953. – 423 с.
- [6] Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
- [7] Тимошенко С. П. Устойчивость упругих систем / С. П. Тимошенко. – М., 1978.
- [8] Вагнер Г. В. Балки с весьма тонкой стенкой / Г. В. Вагнер // Сборник переводов ЦАГИ : под ред. Уманского А. А., Знаменского П. М. – М. : ЦАГИ, 1937. – С. 58–117.
- [9] Білик С. І. Рациональні рамні каркаси постійного та змінного двотаврового перерізу з підвищеною гнучкістю стінки / С. І. Білик, І. О. Склярів // Зб. наук. праць Укр. наук.-дослід. і проект. інст. сталев. констр. ім. В. М. Шимановського. – К. : Сталь, 2010. – Вип. 5. – С. 199–209.
- [10] Склярів І. О. Рациональна висота перерізу двотаврових рамних конструкцій змінної жорсткості з гнучкою стінкою / І. О. Склярів, С. І. Білик // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одеса : Внешрекламсервис, 2010. – №14. – Ч. 1. – С. 230–235.
- [11] Снитко Н. К. Сопротивление материалов / Н. К. Снитко – Л.: Из-во Ленинградского университета, 1975. – 368 с.
- [12] 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.
- [13] 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.