

НЕУЗГОДЖЕНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ ПОЗАЦЕНТРОВО СТИСНУТИХ СТАЛЕВИХ ДВОТАВРОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ЗГІНАЛЬНО- КРУТИЛЬНОЮ ФОРМОЮ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ

DISCONFORMITY OF RESULTS OF CALCULATION OF ECCENTRIC COMPRESSED STEEL I-ELEMENTS FOR FLEXURAL-TORSIONAL BUCKLING

*к.т.н. Гудзь С.А. (Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка)*

*c.t.s. Goods S.A. (Poltava National Technical University named after Yuri
Kondratyuk)*

Анотація. У роботі проведено порівняльний аналіз нормативних методик визначення несучої здатності гнучких сталевих двотаврових елементів, що зазнають стиску та згину, виявлено їх переваги та недоліки, встановлено межі застосування вітчизняної методики.

Abstract. In the article are analyzed with comparison normative methods for determining the carrying capacity of flexible steel I-beams-columns, revealed their strengths and weaknesses, set the scope of application of national methods.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Як відомо, поздовжня сила в позacentрово стиснутому елементі зміщена відносно центра ваги поперечного перерізу на величину ексцентриситету e . В стиснуто-згинному елементі, який може виступати частиною поперечної рами каркасної будівлі, одночасно діють два незалежних силових фактори: поздовжня сила N і згинальний момент M . Але при виконанні практичних розрахунків за вітчизняними нормами стиснуто-згинні стержні замінюють позacentрово стиснутими, оскільки в обох випадках елемент перебуває під дією поздовжньої сили зі згином. Замість заданого для стиснуто-згинного стержня моменту M і нормальної сили N враховують тільки цю силу, але прикладену з ексцентриситетом $e = M/N$. У розрахунок таких елементів на стійкість, що міститься в нормах, вводиться додатковий коефіцієнт, що враховує початкові недосконаліості. Окрім знижувальних коефіцієнтів, що враховують згинальну і поперечно-крутильну форму втрати стійкості

при поздовжньому та поперечному згині відповідно (в українських нормах вони відповідають коефіцієнтам стійкості при центральному стиску та при згині), в європейських нормах присутні ще і коефіцієнти взаємодії між внутрішніми зусиллями, визначення котрих досить складне. Ця особливість є їхньою характерною рисою, що дозволяє врахувати впливи другого роду. Для збільшення точності розрахунків і наближення їх до дійсних умов роботи конструкції внутрішні зусилля потрібно визначати за нелінійною теорією другого порядку. Вона враховує геометричну нелінійність і являє собою по суті розрахунок за деформованою схемою, в якому рівняння рівноваги записуються для деформованого стану системи. Цікавим видається дослідження європейського підходу та використання закордонного досвіду в питаннях розрахунку на стійкість.

Аналіз останніх досліджень. Відомі в усьому світі праці професора С.П. Тимошенка заклали теоретичну основу розрахунку металевих «балок-колон» незамкненого профілю на сумісну дію стиску та згину. Його теорія пружної стійкості [1] дала передумови для визначення критичного навантаження при складному опорі. А застосування енергетичного методу до задач стійкості отримало бурхливий розвиток у теперішній час. Експериментальними і теоретичними дослідженнями стійкості позацентрово стиснутих елементів донедавна займалися С.І. Білик [2], А.І. Маневич, С.В. Ракша [3], А.М. Пащенко, Г.М. Трусов, Є.Ю. Фоменко та інші.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Одним із найменш досліджених питань, які постають перед проектувальником при розрахунку сталевих конструкцій є розрахунок позацентрово стиснутих елементів за згинально-крутильною формою втрати стійкості, яка часто буває вирішальною при визначенні несучої здатності. Це питання залишається відкритим і потребує ґрунтовних досліджень і порівняльного аналізу різних методик розрахунку.

Постановка мети і задач досліджень. У роботі поставлено за мету провести порівняльний аналіз методик визначення несучої здатності та напружено-деформованого стану сталевих двотаврових елементів за стійкістю, виявивши їх переваги та недоліки, і на основі аналізу спробувати встановити межі застосування вітчизняної методики.

Виклад основного матеріалу. Навіть при згині позацентрово стиснутих елементів лише в площині найбільшої жорсткості, що збігається з площиною симетрії, стає можливою втрата стійкості з площини дії моменту при згинально-крутильних деформаціях раніше досягнення граничної сили N , що приймається як критерій при плоскій формі втрати стійкості.

У цьому випадку перевірку стійкості вітчизняні норми [4] рекомендують виконувати в площині найменшої жорсткості як центрально стиснутого елемента з введенням коефіцієнта c , що враховує вплив згинального моменту M_x на просторову втрату стійкості стержня. При великих згинальних моментах M_x ($m_x \geq 10$) вимоги норм забезпечують перехід до випадку втрати стійкості згинних елементів. При значній гнучкості втрата стійкості відбувається зазвичай у межах пружних деформацій. У цьому випадку для визначення коефіцієнта c використано теорію стійкості тонкостінних стержнів В.З. Власова. Але отримане значення коефіцієнта c не повинне перевищувати максимального значення c_{max} , встановленого для пластичних деформацій.

Розрахункова формула при цьому принципово не відрізняється від підходу в попередніх радянських нормах [5], а також у їх актуалізованій редакції для Російської Федерації [6] (де лише дещо уточнилися коефіцієнти стійкості при центральному стиску) та у сучасних нормах [7], розроблених взамін [5]. Спочатку для визначення коефіцієнтів c (при значеннях $m_x \leq 5$) на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень Г.М. Чувікіна [8] для різних типів перерізів було встановлено коефіцієнти α і β , що містяться у відповідних таблицях перерахованих нормативних документів. Згодом у норми (спершу в російські [7], потім в українські [4]) поступово впровадилась відмінність, яка полягає у введенні невідомим нам автором додаткового коефіцієнта ν , що залежить від гнучкості стержня та геометричних розмірів перерізу. Нами було вирішено дослідити вплив цього чинника на несучу здатність елемента й оцінити її достовірність, порівнявши отримані значення з даними розрахунку за європейськими нормами [9, 10], який передбачає часткові формули теорії другого порядку з урахуванням коефіцієнтів взаємодії.

Щоб визначити умовну гнучкість для втрати стійкості за поперечно-крутильною формою, залежно від якої встановлюється знижувальний коефіцієнт стійкості при згині за європейськими нормами, потрібно знати критичний момент втрати стійкості плоскої форми згину в пружній стадії (умовний критичний згинально-крутильний момент). Значення M_{cr} для шарнірно опертої по кінцях двотаврової балки, завантаженої рівномірно розподіленим навантаженням, може бути встановлене згідно з національним додатком National Application Document (NAD) до EN 1993-1-1. В інших випадках критичний момент рекомендується визначати чисельно за допомогою моделювання. Для шарнірно опертого по кінцях стержня, завантаженого рівномірно розподіленим

навантаженням і опорними згинальними моментами, існує методика визначення критичного моменту M_{cr} , яку наведено в п. 6.6 роботи [11] і розвинуто в додатку NCCI [12], де за таких умов теж рекомендується використання спеціальної безкоштовної програми LTBeam (вона може бути вільно завантажена із сайту: <http://www.cticm.com>). Критичний момент M_{cr} для подвійно симетричних перерізів може визначатися так:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{0.5} - C_2 z_g \right\}, (1)$$

де C_1 , C_2 – коефіцієнти, що залежать від виду епюри згинального моменту й умов закріплення кінців балки; при різних опорних згинальних моментах залежать ще і від співвідношення моментів (окрема методика);

k , k_w – коефіцієнти (приведення) розрахункової довжини, які відносяться до повороту кінців балки у плані та до депланації кінців балки (можна прийняти $k = k_w = 1$ в запас);

E , G – модулі пружності та зсуву відповідно;

I_z – момент інерції перерізу відносно осі z ;

I_w – секторіальний момент інерції перерізу балки;

I_t – момент інерції перерізу при чистому (вільному) крученні;

z_g – ордината точки прикладення навантаження відносно центра згину.

Момент інерції двотаврового перерізу при чистому крученні I_t в цих розрахунках визначався без множника 1,3, що характеризує тип перерізу, оскільки саме таке його значення рекомендує європейська методика, яка більш консервативна в цьому відношенні, на відміну від методики ДБН. Окрім цього, інколи необхідно врахувати крутильну і/або зсувну жорсткість конструкцій, що дискретно чи континуально розкріплюють стиснутий пояс елемента в більшості практичних випадків і зменшують деформації його зміщення (прогони, в'язі, сталевий плоский або профільований настил). Врахування заокруглень у місці примикання полиць до стінки дозволяє суттєво збільшити значення моменту інерції. Його теж можна визначити в поширеній комп'ютерній програмі LTBeam.

Порівняння відбувалось при однаковому розподілі внутрішніх зусиль по довжині шарнірно опертого елемента, що згинається в

площині стінки (розподіл поздовжньої сили приймався постійний; розподіл згинального моменту – постійний і трикутний). Значення розрахункової поздовжньої сили всюди становило 200 кН, хоча частковий коефіцієнт надійності за навантаженням у Єврокодi значно більший від українського (на 25 – 29%). При трикутному розподілі враховувались особливості різних норм по вибору місця розташування розрахункового згинального моменту для згинально-крутильної форми втрати стійкості. Значення моментів і довжин стержнів у прикладах варіювались для зміни відносного ексцентриситету та гнучкості. Міцнісні характеристики матеріалу бралися як для сталі С245. Розміри поперечних перерізів двох прокатних двотаврів бралися з ГОСТ 26020-83. Підсумки порівняння наведемо у формі графіків на рис. 1 – 3.

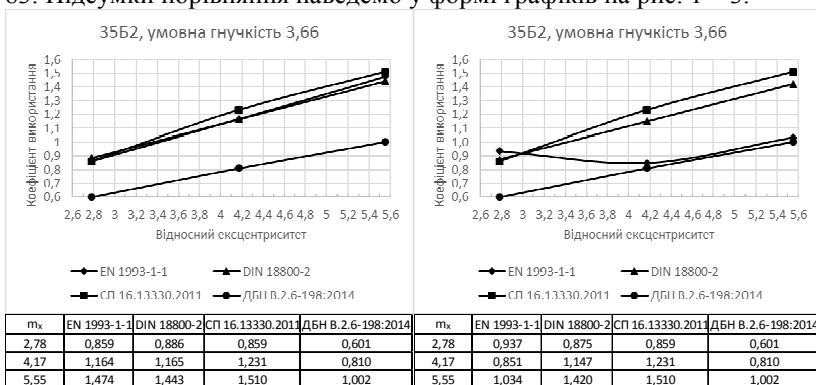


Рис. 1. Залежність коефіцієнта використання від відносного ексцентриситету (трикутний розподіл – ліворуч; постійний – праворуч)

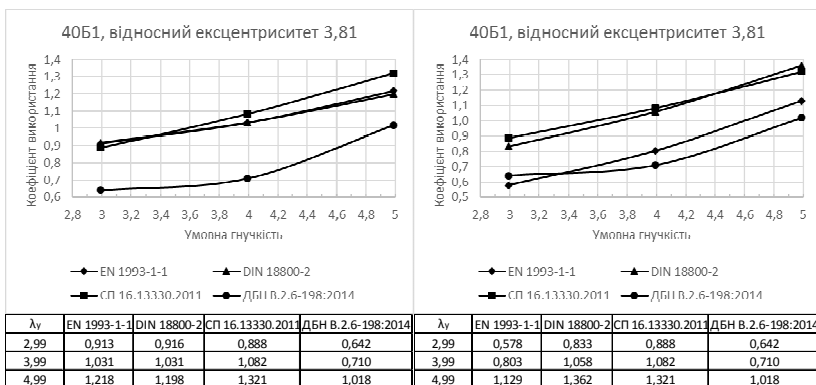


Рис. 2. Залежність коефіцієнта використання від умовної гнучкості (трикутний розподіл – ліворуч; постійний – праворуч)

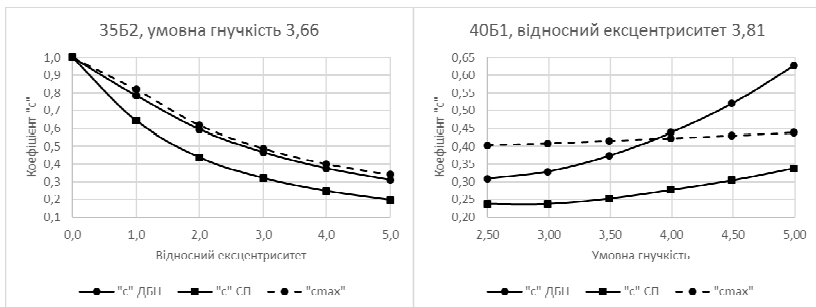


Рис. 3. Залежність коефіцієнта «с» від відносного ексцентриситету й умовної гнучкості

Як видно з рис. 1 і 2, вітчизняна методика узгоджується задовільно тільки з методикою Єврокоду, котра є найбільш деталізованою як для елементів, що зазнають деформацій кручення, і лише при значних відносних ексцентриситетах і малих гнучкостях за умови постійного розподілу згинального моменту. Очевидно, що саме при збільшенні рівномірно розподіленого згинального моменту в площині стінки та відносно невеликій поздовжній силі в коротких стержнях відбувається ефект «розвантаження», тобто послаблюється вплив на несучу здатність втрати стійкості із площини згину і посилюється вплив втрати стійкості в площині згину. Тому поширення «вдосконаленої» методики, яка, напевно, спиралася на такі дослідження, на інші випадки роботи неправомірно та не відповідає вимогам безпеки.

Аналізуючи рис. 3, де при збільшенні гнучкості спостерігається різка тенденція до зростання значень коефіцієнта c за методикою ДБН порівняно з попередньою, можна дійти висновку про їх завищення, не зважаючи на обмеження максимальним значенням.

Для розрахунку позацентровано стиснутих двотаврових елементів не рекомендується застосовувати модуль «Кристалл» (програмний комплекс SCAD Office), оскільки він дає значну «похибку», тобто рахує некоректно, суттєво занижуючи несучу здатність, що йде в запас міцності. При цьому результати розрахунку окремо на центральний стиск і поперечний згин ідентичні результатам ручного розрахунку. Нормативний розрахунок стійки у цьому модулі дає в нашому випадку при трикутному розподілі моменту на 58 – 112% більший коефіцієнт використання за EN 1993-1-1, на 18 – 51% за СП 16.13330.2011; на 78 – 116% за ДБН В.2.6-198:2014; при постійному розподілі – відповідно на 20 – 88%, на 0 – 5%, на 23 – 59% порівняно з верифікованим машинним результатом, взятим за еталон. Це не важко перевірити.

Висновки. Аналіз розбіжності результатів розрахунку за різними нормами показав, що введення коефіцієнта γ в чинні норми [4, 7] при трикутному розподілі моменту не підтверджується порівнянням з іншими нормами [5, 6, 9, 10], суперечить попереднім теоретично-експериментальним дослідженням [8], необґрунтовано завищуючи несучу здатність позацентрово стиснутого елемента у значній мірі. Це створює передумови для перегляду норм у бік збільшення надійності.

Список літератури

1. Timoshenko S.P. and Gere J.: Theory of Elastic Stability (2nd ed.), McGrawHill, New York, 1961. – 541 p.
2. Білик С.І. Просторова стійкість сталевих колон зі змінною висотою перерізу. Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М.Шимановського, 1, 2008. – С. 120 – 126.
3. Маневич А.И. О расчете по СНиП II-23-81 тонкостенных стержней на устойчивость по изгибно-крутильной форме / А.И. Маневич, С.В. Ракша // Известия вузов. Строительство, 12, 2000. – С. 119 – 123.
4. ДБН В.2.6-198:2014. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування / Остаточна редакція. Видання офіційне. – Надано чинності з 1 січня 2015 р. – К.: Мінрегіонбуд України, 2014. – 199 с.
5. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
6. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции / Минрегион России. – М.: ГУП ЦПП, 2011. – 172 с.
7. СНиП 53-100-2010. Стальные конструкции. Нормы проектирования / Минрегион России. – М.: ГУП ЦПП, 2010. – 201 с.
8. Чувикин Г.М. Об устойчивости за пределом упругости внецентренно сжатых тонкостенных стержней открытого профиля. – В кн.: Исследования по стальным конструкциям. Вып. 13. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 70 – 159.
9. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010. Єврокод 3: Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд. – К.: Мінбуд України, 2011. – 150 с.
10. DIN 18800 Teil 2: Stahlbauten – Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken, 1990. – 44 s.
11. Kindmann, R.: Stahlbau, Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung. 4. Auflage, Berlin: Ernst & Sohn, 2008. – 429 s.
12. Access Steel: NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling. SN003a-EN-EU, Access Steel, 2008. – 13 p.