



Савицький В. В. [1; ORCID ID: 0000-0001-8807-9486],

к.т.н., доцент,

Кочкар'ов І. Д. [1; ORCID ID: 0009-0002-8059-7523],

здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня,

Лозицька В. О. [1; ORCID ID: 0009-0008-7214-3226],

здобувачка вищої освіти першого (бакалаврського) рівня

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ПОРІВНЯЛЬНІ РОЗРАХУНКИ СТІЙКОСТІ ОДНОПРОЛІТНИХ МЕТАЛЕВИХ БАЛОК ЗА РІЗНИМИ МЕТОДИКАМИ РОЗРАХУНКУ

У статті наведено порівняльні розрахунки стійкості однопролітних металевих балок за різними методиками. Розглянуто визначення навантаження, за якого відбувається втрата стійкості металевих однопролітних балок. Такий розрахунок виконаний за чинними нормами проєктування «ДБН В.2.6-198:2014», за нормами «Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009» та «СНіП II-23-81*». Додатково стійкість таких балок була перевірена на їх просторовій моделі, створеній оболонковими скінченними елементами в пружній постановці. Проаналізовано вплив пластичного та стержневого методів на загальну стійкість металевих балок. Визначено найбільше та найменше значення навантаження, при якому відбувається втрата стійкості балки.

Ключові слова: стійкість; стержневий метод; пластичний метод; граничний стан; однопролітні металеві балки; норми проєктування.

Актуальність. На сьогодні розрахунок металевих конструкцій, поряд із використанням чинних нормативних документів, зокрема «ДБН В.2.6-198:2014» [1], може бути виконаний за нормами «Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009» [2], при цьому більшість конструкцій запроектована за нормами «СНіП II-23-81*» [3]. Варто відзначити, що в питаннях розрахунку на міцність використовуються схожі підходи [4], [6], [7], тому результати розрахунку на міцність доволі близькі. Чого не можна сказати про розрахунок на стійкість згинальних металевих елементів. Цей розрахунок суттєво впливає як на підбір остаточного поперечного перерізу, так і на його розкріплення з площини. Все це впливає на остаточну вартість металевих конструкцій, з огляду на це питання порівняння результатів розрахунків на стійкість за різними методиками є доволі актуальним.

Мета роботи: виконати порівняльні розрахунки стійкості згинальних однопролітних металевих балок за ДБН В.2.6-198:2014 [1], Eurocode 3 (EN 1993-1-1:2005/AC:2009) [2] та СНіП ІІ-23-81* [3], визначити навантаження, при якому настає втрата стійкості, та оцінити вплив стержневого і пластичного методів (скінченні елементи, пружна постановка) моделювання на значення критичного навантаження.

Методика розрахунку. Для порівняльних розрахунків розглянемо однопролітну металеву балку двотаврового поперечного перерізу прольотом 6м з шарнірно рухомою опорою з одного боку та шарнірно нерухомою опорою з іншого (рис. 1). Переріз балки прийнятий у вигляді зварного двотавра, з розміром поясу 20 см×1 см та з розміром стінки 30 см×0,8 см (рис. 2).

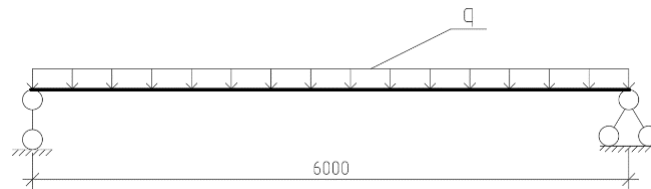


Рис. 1. Розрахункова плоска модель металевої балки з прикладеною рівномірно розподіленим навантаженням

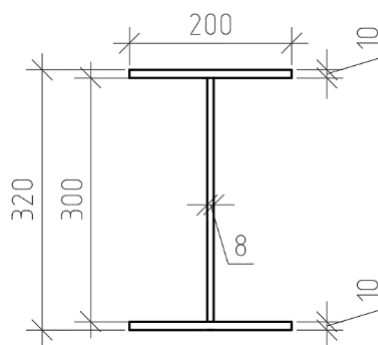


Рис. 2. Склад перерізу балки

Балка виготовлена зі сталі С245, та має наступні жорсткісні характеристики: E_F – жорсткість елемента на осьовий стиск (розтяг) = $1,3184e+006$ кН; E_{ly} – жорсткість елемента на згин навколо осі $Y_1 = 23511,5$ кН×м²; E_{lz} – жорсткість елемента на згин навколо осі $Z_1 = 2749,44$ кН×м²; G_{lk} – жорсткість елемента на кручення навколо осі $X_1 = 14,0556$ кН×м².



На балку прикладене рівномірне розподілене навантаження "q", навантаження прикладається на верхній пояс балки. Розкріплення балки прийняті на опорах. Розрахунок виконано за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024 методом скінчених елементів. При розрахунку за нормативними методиками використано стержневі елементи, прийнято стержневий скінчений елемент типу 2 (СЕ плоскої рами). Розрахунок виконано ітераційним методом, шляхом підбору рівномірно розподіленого навантаження яке відповідає коефіцієнту використання 100%.

Також для порівняння змодельована просторова схема, виконана з пластинчастих скінчених елементів типу 41 (універсальний прямокутний СЕ). Оболонкові елементи змодельовані по серединним площинам полицки і стінки двотавра (рис. 3, рис. 4). Розрахунок виконувався з урахуванням моментів за першою формою витрат стійкості.

Навантаження, що відповідає втраті стійкості балки за нормативним документом ДБН В.2.6-198:2014 [1], склало 28,7 кН. При такому навантаженні коефіцієнт використання досліджуваної балки склав 100% за першим граничним станом. Навантаження, що відповідає втраті стійкості балки за нормативним документом Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009 [2], склало 17,9 кН. При такому навантаженні коефіцієнт використання досліджуваної балки склав 100% за першим граничним станом. Навантаження, що відповідає втраті стійкості балки за нормативним документом СНиП II-23-81* [3], склало 37,3 кН. При такому навантаженні коефіцієнт використання досліджуваної балки склав 100% за першим граничним станом. Найменше навантаження, що відповідає втраті стійкості однопролітної металевої балки, відповідає типу розрахунку, коли елемент змодельовано скінченими елементами у вигляді пластин СЕ 41 (таблиця). Це пояснюється тим що розрахунок таких елементів виконано у пружній постановці, без допущення розвитку пластичних деформацій. Основною перевагою даного методу є можливість виконувати розрахунок пошкоджених металевих елементів.

Найбільше навантаження відповідає СНиП II-23-81* [3]. Різниця між СНиП II-23-81* [3] та чинними нормами проєктування складає 1,3%. На що варто звернути особливу увагу при реконструкції існуючих об'єктів, які були запроєктовані за СНиП II-23-81* [3]: такі об'єкти будуть потребувати або збільшення поперечного перерізу, або влаштування додаткових розкріплень з площини. Це стосується елементів, які можуть втрачати стійкість. Також зауважимо, що

норми Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009 [2] є найбільш консервативними, при переході на цей нормативний елемент також необхідно буде проводити певні посилення конструкцій.

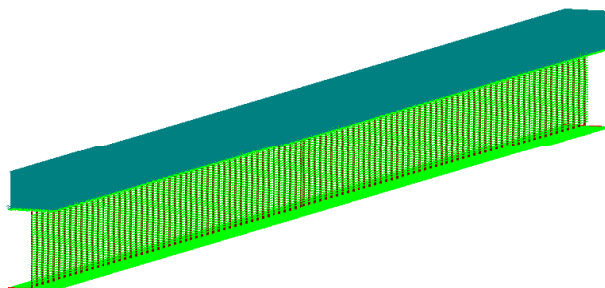


Рис. 3. Розрахункова модель з прикладеною силою балки побудована за допомогою оболонкових елементів у ПК ЛИРА-САПР 24

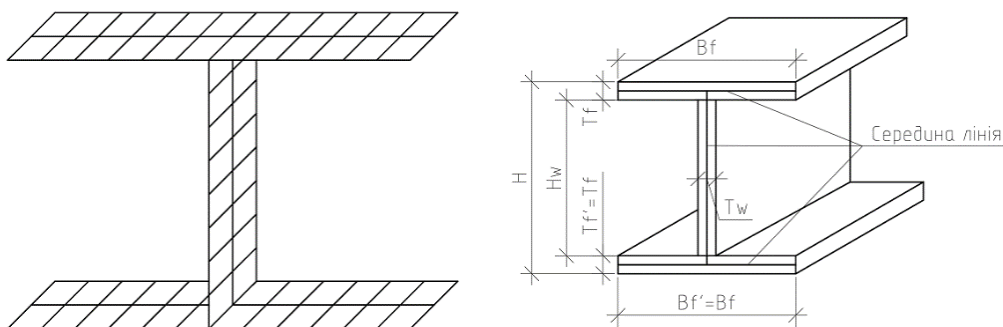


Рис. 4. Оболонкові елементи змодельовані по серединним площинам полицки і стінки двотавру

Таблиця

Порівняння навантаження нормативних документів

№	Тип розрахунку	Навантаження, що відповідає втраті стійкості, кН (кН/м ²)	$q_{нл}/q \times 100\%$
1	ДБН В.2.6-198:2014	28.7	183
2	Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009	17.9	114
3	СНиП II-23-81*	37.3	239
4	Оболонкова проєктна модель	15.6(78)	100



Висновки. Проведені розрахунки стійкості балки, завантаженої рівномірно розподіленим навантаженням, за різними нормативними документами. Вказано на необхідність посилення балок, які можуть втратити стійкість, що були запроєктовані за СНиП II-23-81* [3] при переході на нові нормативні документи [1]. Усі нормативні методики допускають пружно-пластину роботу при розрахунку балок на стійкість, найбільш консервативним є розрахунок за нормами Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009 [2].

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. URL: https://dbn.co.ua/dbn_v_2_6_198_2014_stalevi_konstrukciji. (дата звернення: 25.02.2025). 2. EN 1993-1-1 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. 3. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/snip/4-1-0-18>. (дата звернення: 25.02.2025). 4. Клименко Ф. Є., Барабаш В. М. Металеві конструкції : підручник для вузів. Львів : Світ, 1994. 277 с. 5. Simões da Silva L., Tankova T. & Rebelo C. Safety Assessment of Eurocode 3 Stability Design Rules for Prismatic Members in Bending and Compression. *International Journal of Steel Structures*. 2020. Vol. 20(1). Pp. 343–354. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00285-5>. (дата звернення: 25.02.2025). 6. Клименко Ф. Є., Барабаш В. М., Стороженко Л. І. Металеві конструкції : підручник / за ред. Ф. Є. Клименка. 2-ге вид., випр. і допов. Львів : Світ, 2002. 312 с. URL: https://dbn.co.ua/load/book/klimenko_fe_barabash_vm_storozhenko_li_metalevi_konstrukciji/16-1-0-332. (дата звернення: 25.02.2025). 7. Перельмутер А. В., Юрченко В. В. Вибрані проблеми розрахунку та оптимального проектування сталевих конструкцій із холодногнутих профілів. Київ : Каравела, 2022. 205 с. ISBN 978-966-8019-33-3.

REFERENCES:

1. DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. URL: https://dbn.co.ua/dbn_v_2_6_198_2014_stalevi_konstrukciji. (data zvernennia: 25.02.2025). 2. EN 1993-1-1 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. 3. SNyP II-23-81*. Stalnye konstruktsyy. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/snip/4-1-0-18>. (data zvernennia: 25.02.2025). 4. Klymenko F. Ye., Barabash V. M. Metalevi konstruktsii : pidruchnyk dlia vuziv. Lviv : Svit, 1994. 277 s. 5. Simões da Silva L., Tankova T. & Rebelo C. Safety Assessment of Eurocode 3 Stability Design Rules for Prismatic Members in Bending and Compression. *International Journal of Steel Structures*. 2020. Vol. 20(1). Pp. 343–354. URL: <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00285-5>. (data zvernennia: 25.02.2025). 6. Klymenko F. Ye., Barabash V. M., Storozhenko L. I. Metalevi konstruktsii : pidruchnyk / za red. F. Ye. Klymenka. 2-he vyd., vypr. i dopov. Lviv : Svit, 2002. 312 s. URL: https://dbn.co.ua/load/book/klimenko_fe_barabash_vm_storozhenko_li_metalevi_konstrukciji/16-1-0-332. (data zvernennia: 25.02.2025). 7. Perelmuter A. V., Yurchenko V. V. Vybrani problemy rozrakhunku ta optimalnoho proiektuvannia

stalevykh konstruktzii iz kholodnohnutykh profiliv. Kyiv : Karavela, 2022. 205 s.
ISBN 978-966-8019-33-3.

Savytskyi V. V. ^[1; ORCID ID: 0000-0001-8807-9486],

Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor,

Kochkarov I. D. ^[1; ORCID ID: 0009-0002-8059-7523],

Senior Student,

Lozytska V. O. ^[1; ORCID ID: 0009-0008-7214-3226],

Senior Student

¹*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

COMPARATIVE CALCULATIONS OF THE STABILITY OF SINGLE-SPAN METAL BEAMS USING DIFFERENT CALCULATION METHODS

The calculation of metal structures, along with the use of current regulatory documents, in particular “DBN V.2.6-198:2014”, can be performed according to the standards “Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009”, while the vast majority of structures are designed according to the standards “SNiP II-23-81*”. It is worth noting that similar approaches are used in strength calculations, so the results of strength calculations are quite close. What cannot be said about the calculation of the stability of bending metal elements. This calculation significantly affects both the selection of the final cross-section and its unbending from the plane. All this affects the final cost of metal structures, in view of this issue, comparing the results of stability calculations using different methods is quite relevant. The purpose of the work: to perform comparative calculations of the bending stability of single-span metal beams according to DBN V.2.6-198:2014, Eurocode 3 (EN 1993-1-1:2005/AC:2009) and SNiP II-23-81*, to determine the load at which the loss of stability occurs, and to assess the influence of the rod and plastic methods (finite elements, elastic formulation) of modeling on the critical load value. For comparative calculations, we will consider a single-span metal beam of I-beam cross-section with a hinged movable support on one side and a hinged fixed support on the other. The beam cross-section is taken in the form of a welded I-beam. The beam is made of steel. A uniform distributed load is applied to the beam, the load is applied to the upper chord of the beam. The beam is supported at the supports. The calculation was performed using the LIRA-SAPR 2024 software package using the finite element method. When calculating according to regulatory methods, rod elements were used, a type 2 rod finite element (SE of a flat frame) was adopted. The calculation was performed by the iterative method, by selecting a uniformly distributed load that corresponds to a utilization factor



of 100%. Also, for comparison, a spatial scheme made of plate finite elements of type 41 (universal rectangular SE) was simulated. The shell elements were modeled along the median planes of the flange and wall of the I-beam. The calculation was performed taking into account moments according to the first form of stability costs. The smallest load corresponding to the loss of stability of a single-span metal beam corresponds to the type of calculation when the element is modeled by finite elements in the form of plates SE 41. This is explained by the fact that the calculation of such elements is performed in an elastic setting, without allowing the development of plastic deformations. The main advantage of this method is the ability to perform the calculation of damaged metal elements. The highest load corresponds to SNiP II-23-81*. The difference between SNiP II-23-81* and the current design standards is 1.3%. What should be paid special attention to when reconstructing existing objects that were designed according to SNiP II-23-81*: such objects will require either an increase in the cross-section or the installation of additional reinforcements from the plane. This applies to elements that may lose stability. We also note that the Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009 standards are the most conservative, when switching to this regulatory element it will also be necessary to carry out certain structural strengthening. Calculations of the stability of a beam loaded with a uniformly distributed load were carried out according to various regulatory documents. The need to strengthen beams that may lose stability, which were designed according to SNiP II-23-81*, is indicated when switching to new regulatory documents. All regulatory methods allow elastic-plate work when calculating beams for stability, the most conservative is the calculation according to Eurocode 3 EN 1993-1-1:2005/AC:2009.

Keywords: stability; beam method; plastic method; limit state; single-span steel beams; design standards.

Отримано: 04 травня 2025 року
Прорецензовано: 05 червня 2025 року
Прийнято до друку: 16 червня 2025 року