

УДК 624.07

DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-44-52

**МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕМЕНТІВ
ПРИ ЗГІНІ ЗГІДНО З ЄВРОКОД 3**

М.В. Адамчук

к.т.н, доцент кафедри

«Цивільна інженерія та архітектура»

К.Ю. Федорова

к.т.н, доцент кафедри

«Цивільна інженерія та архітектура»

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. Використання європейських норм проектування в Україні, зокрема для сталевих конструкцій – Єврокод 3, стало можливим починаючи з липня 2014 року. З урахуванням того, що Україна набрала статус кандидата у члени Євросоюзу, опанування і застосування вказаних норм – є нагальною необхідністю.

Розглянуто методи розрахунку сталевих елементів згідно з Єврокодом 3. Зокрема в частині прийняття згинального моменту балковими елементами, що мають стандартний симетричний переріз.

Проведено аналіз рекомендованих методів.

Ключові слова: Єврокод 3, міцність сталевих елементів, втрата стійкості за втратою плоскої форми згину.

UDC 624.07

DOI 10.47049/2226-1893-2022-1-44-52

**METHODS FOR CALCULATION OF ELEMENTS
IN BENDING ACCORDING TO EUROCODE 3**

Nikolay Adamchuk

PhD, docent of the department «Civil Engineering and Architecture»

Catherine Fedorova

PhD, docent of the department «Civil Engineering and Architecture»

Odesa National Maritime University

Abstract. The use of European design standards in Ukraine, in particular for steel structures – Eurocode 3, has become possible since July 2014. Taking into account the fact that Ukraine has received the status of a candidate member of the European Union, the development and application of these norms is an urgent need.

Bending and, accordingly, the perception of a bending moment is a common task that a design engineer has to solve. European codes, as well as national codes of Ukraine, provide in this case two checks of the cross-section: capacity and buckling resistance. Checking the capacity of special difficulties does not cause. Checking the buckling resistance of a bending element is somewhat more difficult due to the need to determine the reduction factor for the relevant buckling mode. This coefficient, in turn, depends mainly on non-dimensional slenderness of the element. Methods for calculating the buckling resistance of the element are determined based on the possibilities of obtaining the non-dimensional slenderness of the element.

The key point of the methodology is the calculation of the non-dimensional slenderness. Three calculation methods defined:

- *lateral torsional buckling curves 6.3.2.2 [1].*

This method requires obtaining a critical moment for lateral-torsional buckling (M_{cr}). It should be noted that the standards do not provide formulas for its calculation, but indicate that obtaining M_{cr} based on gross cross sectional properties and takes into account the loading conditions, the real moment distribution and the lateral restraints.

There are three cases for this method:

- general case. It is used for any types of sections. It is characterized by the most accurate ("rigid") assessment of the element's behavior during buckling.

- special (local) case item. 6.3.2.3 [1] for rolled or equivalent welded sections. For this type of section, the codes provide formulas that eventually lead to a slightly higher bearing capacity than for the general case.

- local case, using a simplified method for determining the non-dimensional slenderness without the need to calculate M_{cr} . The calculation is quite simple (based on some table values), but with some loss of efficiency [9].

• *simplified assessment methods for beams with restraints in buildings item 6.3.2.4 [1]. This method does not require the calculation of M_{cr} .*

• *general method for lateral and lateral torsional buckling. The following method item 6.3.4 [1] may be used where the previous methods do not apply. Guid [9] indicates, that method is relatively new, and, as such, has not yet been subjected to the same level and breadth of scrutiny as the more established methods.*

Some national codes limits application of the method to straight members subject to in-plane mono-axial .

The paper considers the first method for calculating bending elements. A comparison is made for the three indicated cases. It is noted that the second case (for rolled or equivalent welded sections) gives buckling resistance approximately 20 % higher than for the «rigid» first case. The third case gives a result close to the first general case, if the flexibility of the bending element is not higher than 100.

Keywords: *Eurocode 3, capacity, buckling resistance.*

Вступ. Україна долучається до Євросоюзу. І вже набула статус кандидата в члени цієї організації. Багато зусиль докладається і ще доведеться докласти, щоб стати повноцінним учасником європейської сім'ї. Одним із напрямків діяльності,

що дозволяє розглядати Україну, як інтегровану європейську державу – є впровадження і застосування будівельних норм проектування. З липня 2014 стало можливим застосування європейських норм – Єврокодів – на території України. Підготовлена україномовна версія норм, випускаються необхідні національні додатки. Публікуються статті та настанови з питань проектування конструкцій.

Інформація, щодо основ проектування конструкцій, зокрема сталевих, необхідна, як здобувачам освіти, так і діючим проектувальникам. В даній роботі розглядається питання стосовно розрахунку елементів конструкцій при дії згинального моменту. Наведені доступні методи розрахунку та проведено аналіз отриманих результатів.

Постановка проблеми. Аналіз європейських нормативних документів (Єврокод 3) щодо проектування сталевих конструкцій при згині для двосиметричних перерізів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Провідні українські науково-дослідні організації, вищі навчальні заклади докладають чимало зусиль в частині роз'яснень, вивчення та застосування європейських норм проектування. Зокрема в частині, що відноситься до сталевих конструкцій (ця частина позначається в нормах, як Єврокод 3), можна відзначити ряд публікацій.

Значну роботу в цьому напрямку виконав Український центр сталевих будівництва. В роботі [4] наведена структура системи Єврокодів, базова термінологія та умовні позначення. Ряд робочих прикладів, зокрема: сталеві балкові клітини, однопрольотної рами – ознайомлюють з правилами проектування із урахуванням з національних особливостей. В роботі [5] розглянуті основні принципи проектування конструкцій у відповідності із Єврокодом 3. Наведена послідовність виконання основних розрахунків для балкових елементів, розтягнутих та стислих перерізів, стисло-гнутих та поза-центрово стислих елементів. Ще два посібники [6] та [7] присвячені окремому типу перерізу, що посів провідне місце в лінійці сталевих конструкцій – це легкі сталеві тонкостінні перерізи. Посібники охоплюють весь спектр необхідних розрахунків: від оцінки характеристик перерізу до проектування ЛСТК елементів при різних видах напруженого стану. Пояснення надані разом із прикладами розрахунку.

Основний матеріал дослідження. Розрахунок несучої здатності елементу при дії згинального моменту забезпечується при виконанні умов

• міцності $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$ п. 6.2.5 [1]

• стійкості $\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0$ п. 6.3.2.1 (1) [1]

де M_{Ed} – розрахункове значення згинального моменту;

$M_{c,Rd}$ – розрахункова несуча здатність елементу;

$M_{b,Rd}$ – розрахунковий опір при дії моменту при втраті стійкості,

Далі по матеріалу розглядається випадок розрахунку нерозкріплених балок. Для них головним критерієм є перевірка втрати стійкості. Значення розрахункового опору при втраті стійкості визначається як

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \frac{f_y}{\gamma_{M_1}} \quad \text{п. 6.3.2.1 (3) [1]}$$

де W_y – момент опору перерізу, що призначається залежно від класу перерізу:

- $W_y = W_{pl,y}$ для поперечних перерізів класів 1 і 2;
- $W_y = W_{el,y}$ для поперечних перерізів класу 3;
- $W_y = W_{eff,y}$ для поперечних перерізів класу 4.
- f_y – межа текучості сталі;
- χ_{LT} – понижувальний коефіцієнт при втраті стійкості за плоскою формою згину.

Значення коефіцієнту χ_{LT} залежить, насамперед, від умовної гнучкості елемента $\bar{\lambda}_{LT}$. Це є ключовий момент. Саме за необхідності розрахунку умовної гнучкості визначились три методи розрахунку χ_{LT} :

- *Перший метод.* Застосовує *криві стійкості* для згинно-крутильної форми. Цей метод вимагає розрахування критичного моменту M_{cr} .

Для цього методу характерні три випадки:

- загальний випадок – використовується для будь-яких перерізів п. 6.3.2.2 [1]. Характеризується найбільш точною («жорсткою») оцінкою поведінки елемента при втраті стійкості.

- локальний випадок (1) – для прокатних або еквівалентних зварних перерізів п.6.3.2.3 [1]. Тут застосовуються припущення та формули, що приводять до дещо більшої несучої здатності елемента у порівнянні із загальним випадком.

- локальний випадок (2) - для прокатних або еквівалентних зварних перерізів [9]. Тут умовна гнучкість $\bar{\lambda}_{LT}$ отримується без необхідності розрахування M_{cr} . Для її визначення розроблені спеціальні таблиці, що дають результат подібний до точного випадку з невеликою втратою економічності.

- *Другий метод.* Стосується спрощеної оцінки стійкості балок із розкріпленням в будівлях та спорудах п.6.3.2.4 [1]. Цей метод не вимагає розрахування критичного моменту M_{cr} .

- *Третій метод.* Загальний метод розрахунку на стійкість.

Цей метод п.6.3.4 [1] може використовуватись у випадку, якщо не застосовуються попередні методи. Він дозволяє перевірити опір на втрату стійкості за поперечною та згинально-крутильною формами для елементів конструкції, таких як:

- окремі елементи, в тому числі складеного перерізу, постійного або змінного за довжиною, з умовами опираючості, в тому числі складними, або плоскі рами або частини рам, що містять такі елементи, які підлягають дії стискання та/або одноосового згину у площині, що не містять поворотних шарнірів пластичності.

Цей метод є відносно новим і не є достатньо вивченим [9], як попередні методи. Рекомендується з обережністю ставитись до цього метода. Деякі національні додатки обмежують використання цього методу прямолінійними елементами, що згинаються в одній площині.

В поточній роботі аналізується перший метод розрахунку χ_{LT} та його супутні випадки.

Загальний випадок. Для елементів, що згинаються, постійного поперечного перерізу значення χ_{LT} для відповідної умовної гнучкості $\bar{\lambda}_{LT}$ визначається за формулою

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1$$

де

$$\chi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{Lt} (\bar{\lambda}_{LT} - \lambda_{LT,0}) + \bar{\lambda}_{LT}^2];$$

α_{Lt} – коефіцієнт недосконалості; $\lambda_{LT,0} = 0,2$;

умовна гнучкість при втраті стійкості за згинально-крутильною формою

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

M_{cr} – критичний момент при втраті стійкості за плоскою формою згину у пружній стадії.

Локальний випадок (1) дійсний для прокатних або еквівалентних зварних перерізів. Значення χ_{LT} для відповідної умовної гнучкості визначається за формулою

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

Відмінність локального випадку (1) від загального методу полягає в більшш «лояльному» значенні $\bar{\lambda}_{LT,0}$. Для загального випадку призначається $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,2$, а для локального - $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$. Як наслідок, таке значення умовної гнучкості (нижче якої можна враховувати тільки спротив вигину й ігнорувати втрату стійкості) призводить до більшого значення $M_{b,Rd}$.

Мінімальне значення β встановлюється на рівні 0,75.

Локальний випадок (2) є спрощеним засобом отримання умовної гнучкості $\bar{\lambda}_{LT}$ [9]. Головна перевага цього засобу полягає в тому, що немає потреби в

розрахуванні критичного моменту M_{cr} . Тут приймають ряд спрощень для двотаврових перерізів з двома осями симетрії. Пропонується розраховувати $\bar{\lambda}_{LT}$ за формулою

$$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{1}{\sqrt{C_1}} U \cdot V \cdot D \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \sqrt{\beta_w}$$

де C_1 – залежить від виду навантаження (для рівномірного навантаження шарнірно-опертої балки 1.132);

U – параметр, що залежить від геометрії перерізу (для двотаврів приймається в інтервалі 0.84-0.9);

V – параметр, що пов'язаний з гнучкістю (як спрощення можна приймати 1);

D – параметр дестабілізації (для врахування навантажень, що прикладені над центром згину балки, коли навантаження може пересуватись). При навантаженні верхньої полицки балки $D = 1.2$; для недестабілізуючих навантажень $D = 1$.

$\bar{\lambda}_z$ – умовна гнучкість відносно слабкої осі

$$(\lambda \downarrow z = \lambda \downarrow z / \lambda \downarrow 1, \lambda \downarrow z = kL / i \downarrow z);$$

k – коефіцієнт приведеної довжини;

β_w – залежить від класифікації перерізу; для класу 1 і 2 $\beta_w = 1$, для класу 3

$$\beta_w = \frac{W_{el}}{W_{pl}}$$

При $C = 1$, $U = 0.9$, $V = 1.0$, $D = 1.0$, $k = 1$ (гарячекатані двотаврові перерізи) створена таблиця [9] за допомогою якої визначається значення $\bar{\lambda}_{LT}$.

Таблиця

$\bar{\lambda}_{LT}$ для різних класів сталі

S235		S275		S355	
$f_y = 235$ H/MM ₂	$f_y = 225$ H/MM ₂	$f_y = 275$ H/MM ₂	$f_y = 265$ H/MM ₂	$f_y = 355$ H/MM ₂	$f_y = 345$ H/MM ₂
$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{L/i_z}{104}$	$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{L/i_z}{107}$	$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{L/i_z}{96}$	$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{L/i_z}{98}$	$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{L/i_z}{85}$	$\bar{\lambda}_{LT} = \frac{L/i_z}{86}$

Для вказаних вище трьох випадків були виконані розрахунки $M_{b,Rd}$ (розрахунковий опір при дії моменту при втраті стійкості) для двотаврового перерізу. Порівняння виконано шляхом співвідношення результатів (коефіцієнт μ) двох локальних випадків ($M_{b1,Rd}$ та $M_{b2,Rd}$) до загального точного методу ($M_{b,Rd}$) залежно від гнучкості балкового елемента $\lambda_z = L/i_z$. Підсумок порівняння наведено на рисунку нижче.

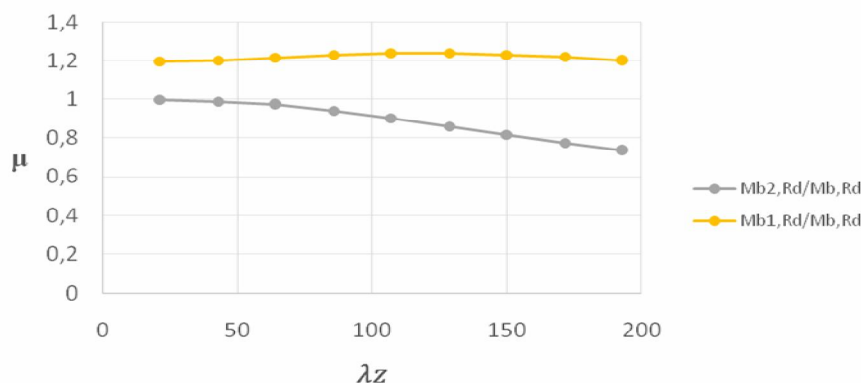


Рисунок. Порівняння результатів розрахунку

Висновки. Висновки стосуються нерозкріплених балок двотаврового перерізу з двома осями симетрії.

Перший локальний випадок ($M_{b1,Rd}$) у порівнянні з точним методом розрахунку ($M_{b,Rd}$) дає розрахунковий опір на 20 % більше. Такий результат є наслідком використання збільшеного значення умовної гнучкості $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 = 0,4$, нижче якої ігнорується втрата стійкості.

Результати другого локального випадку ($M_{b2,Rd}$) близькі до точного результату. І у порівнянні з ним, як було зазначено вище, $M_{b2,Rd}$ характеризується деякою втратою економічності. Але ця втрата стає занадто значною при зростанні гнучкості елемента. Так при $\lambda_z > 100$ опір знижується більше ніж на 10 %. Цей спосіб є привабливим за своєю простотою (не потрібно розраховувати M_{cr}), але його використання слід обмежити для елементів зі значною гнучкістю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні правила. Додаткові правила для холодноформованих елементів і профільованих листів (EN 1993-1-3:2006 IDT). – Київ: Мінрегіон, 2012. – 220 с.
2. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-5:2010. Проектування сталевих конструкцій. Пластинчасті конструктивні елементи. – К.: Мінбуд України, 2011. – 91 с.
3. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-8:2010. Проектування сталевих конструкцій. Проектування з'єднань. – К.: Мінбуд України, 2012. – 204 с.

4. *Примеры расчета стальных конструкций зданий в соответствии с Еврокодом 3 и национальными приложениями Украины / М. Бритл, Д. Браун, А. Билык, Э. Ковалевская. Украинский центр стального строительства, 2015. – 82 с.*
5. *Расчет стальных конструкций зданий в соответствии с Еврокодом 3 и национальными приложениями Украины / Бритл, Д.Браун, Н.А. Беляев, А.С. Билык. Украинский центр стального строительства, 2014. – 99 с.*
6. *Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 / Э. Уэй, М. Хэйвуд, Н.А. Беляев, С.И. Билык, А.С. Билык. Украинский центр строительства, 2014. – 100 с.*
7. *Семко В.А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3. Украинский центр стального строительства, 2015. – 144 с.*
8. *Расчет изгибаемых элементов по ТКП EN / А.Н. Жабинский, А.Г. Рябов. Учебно-методическое пособие по металлическим конструкциям. БНТУ, Минск, 2010. – 43 с.*
9. *Designer's guide to EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures. General rules and rules for buildings. L. Gardner. and D.A. Nethercot. Second edition. Tomas Telford Limited 2011. – 209 p.*
10. *Worked examples for the design of steel structures. Building Research Establishment, Steel Construction Institute and Ove Arup & Partners. Garston, 1994. – 157 p.*
11. *Steel Building Design: Worked examples for students. Edited by: M.E. Brettle. Steel Construction Institute, 2009. – 99 p.*
12. *Examples to Eurocode 3. ECCS – Advisory Committee 5. European convention for constructional steel work, 1993. – 123 p.*

REFERENCES

1. *DSTU-N B EN 1993-1-3:2012. Yevrokod 3. Proektuvannya stalevykh konstruksiy. Chastyna 1-3. Zahal'ni pravyla. Dodatkovi pravyla dlyakholodnoformovanykh elementiv ta profil'ovanykh lystiv (EN 1993-1-3:2006 IDT). – K.: Minrehion, 2012. – 220 s.*
2. *DSTU-N B EN 1993-1-5:2010. Proektuvannya stalevykh konstruksiy. Plastynchasti konstruktivni elementy. – K.: Minbud Ukrayiny, 2011. – 91 s.*
3. *DSTU-N B EN 1993-1-8:2010. Proektuvannya stalevykh konstruksiy. Proektuvannya z"yednan'. – K.: Minbud Ukrayiny, 2012. – 204 s.*
4. *Pryklady rozrakhunku stalevykh konstruksiy budivel' vidpovidno do Yevrokodu 3 ta natsional'nykh dodatkov Ukrayiny / M. Britl, D. Braun, A. Bilyk, E. Kovalevs'ka. Ukrayins'kyy tsentr stalevoho budivnytstva, 2015. – 82 s.*
5. *Rozrakhunok stalevykh konstruksiy budivel' vidpovidno do Yevrokodu 3 ta natsional'nykh dodatkov Ukrayiny / M. Britl, D. Braun, N.A. Byelyayev, A.S. Bilyk. Ukrayins'kyy tsentr stalevoho budivnytstva, 2014. – 99 s.*

6. *Rozrakhunok elementiv iz stalevykh kholodnoformovanykh profiliv vidpovidno do Yevro- kodu 3 / E. Uey, M. Kheyvud, N.A. Byelyayev, S.I. Bilyk, A.S. Bilyk. Ukrayins'kyi tsentr stalevoho budivnytstva, 2014. – 100 s.*
7. *Semko V.A. Rozrakhunok nesuchykh ta ohorodzhuval'nykh konstruksiy iz stalevykh kholodnoformovanykh profiliv vidpovidno do Yevrokodu 3 / Ukrayins'kyi tsentr stalevoho budivnytstva, 2015. – 144 s.*
8. *Rozrakhunok elementiv, shcho z-hynayut'sya po TKP EN / A.N. Zhabins'kyi, A.H.Ryabov. Navchal'no-metodychnyy posibnyk z metalevykh konstruksiy. BNTU, Mins'k, 2010. – 43 s.*
9. *Designer's guide to EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures. General rules and rules for buildings / L. Gardner and D.A. Nethercot. Second edition. Tomas Telford Limited 2011. – 209 p.*
10. *Worked examples for the design of steel structures. Building Research Establishment, Steel Construction Institute and Ove Arup & Parthers. Garston, 1994. – 157 p.*
11. *Steel Building Design: Worked examples for students. Edited by: M.E. Brettle. Steel Construction Institute, 2009. – 99 p.*
12. *Examples to Eurocode 3. ECCS – Advisory Committee 5. European convention for constructional steel work, 1993. – 123 p.*

Стаття надійшла до редакції 29.06.2022

Посилання на статтю: Адамчук М.В., Федорова К.Ю. Методи розрахунку елементів при згині згідно з Єврокод 3 // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць, 2022. № 1(67). С. 44-52. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-44-52.

Article received 29.06.2022

Reference a JournalArtic: Nikolay Adamchuk, Catherine Fedorova. Methods for calculation of elements in bending according to Eurocode 3 // Herald of the Odessa national maritime university. 2022. № 1(67). 44-52. DOI 10.47049/ 2226-1893-2022-1-44-52.