

УДК 624.014.2.078.4

РОЗРАХУНОК БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ НА ЗСУВ І ЗІМ'ЯТТЯ ЗА ДБН В.2.6 – 198:2014 ТА EUROCODE 3

CALCULATION OF BOLTED JOINTS FOR SHEAR AND CRUMPLING BY DBN V.2.6 - 198: 2014 AND EUROCODE 3

Романюк В.В., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Romaniuk V.V., candidate of engineering sciences, associate professor (National University Of Water And Environmental Engineering, Rivne)

Розглянуто розрахунок з'єднань з використанням звичайних болтів на зріз та зім'яття за чинними національними державними будівельними нормами та європейськими нормами. Наведено формули для розрахунку з'єднань та виконано їх порівняльний аналіз. З метою якісної оцінки виконано приклад розрахунку з'єднання елементів за різними нормами.

The calculation of joints with the use of ordinary bolts for shear and crumpling under the existing national state building codes and European norms is considered.

The formulas for the calculation of joints are given and their comparative analysis is carried out, as a result of which it has been established that, unlike national norms in European one joint safety factor is used, while national norms require the use of several coefficients; European norms, unlike national ones, are allowed to use joints in which the calculated shear plane crosses the part of the threaded bolt; the European norms in calculating the bearing capacity of the bolt on the shear is used the value of the ultimate tensile strength of the bolt, and national norms - the value of the design resistance of the bolt shear, which is, obviously, more reasonable than the consideration of the work of the bolt on the shear by introducing into the calculation formula of the additional coefficient; the calculation of the bearing capacity of the bolt to the shear in European norms is carried out without taking into account the coefficient of the working conditions of the connection and its value exceeds the value calculated according to national norms, indicating a significant understatement by national norms of the value of the design resistance of the shear bolt and the failure to take into account the bearing capacity of the bolt to the shear coefficient of working conditions of bolted connection; calculating the load bearing capacity of the bolt for crumpling in European norms gives a significant increase in value compared to national norms, although in the future, after the construction of the connection and correction of the

corresponding coefficients bearing capacity significantly decreases, nevertheless in the final result is still much more than the similar value calculated according to national norms.

In order to qualitatively evaluate an example of calculating the joint of elements according to different standards is done.

Ключові слова: болт, з'єднання, зріз, зім'яття, несуча здатність, опір.
Bolt, joints, shear, crumpling, bearing capacity, resistance.

Болтове з'єднання елементів металевих конструкцій є одним з найбільш розповсюджених типів поєднання елементів між собою і сьогодні дуже актуальним є питання адаптації чинних національних державних будівельних норм і правил, які розроблені провідними науковими установами та мають певну апробацію, до норм проектування країн Євросоюзу Eurocode 3. У розрахунках таких з'єднань за різними нормами існує майже однаковий загальний підхід, але є і суттєві відмінності.

Відповідно до національних норм проектування [1] розрахункове зусилля N_b , яке може бути сприйняте одним болтом, тобто несуча здатність одного болта, визначається залежно від виду напруженого стану за формулами:

а) у разі роботи на зріз

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c ; \quad (1)$$

б) у разі роботи на зім'яття

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{min} \gamma_b \gamma_c . \quad (2)$$

де R_{bs} , R_{bp} , – розрахункові опори болтів відповідно зрізу та зім'яттю (відповідно табл. Д.4 та Д.5 [1]); γ_b – коефіцієнт умов роботи болтового з'єднання, який визначається залежно від розрахункового опору сталі елементів, що з'єднуються, та співвідношення розмірів розміщення болтів (табл. 16.4 [1]); A_b – розрахункова площа поперечного перерізу стержня болта, $A_b = 0,78d_b^2$ (табл. Д.8 [1]); A_{bn} – площа поперечного перерізу болта нетто у місці нарізки (табл. Д.8 [1]); n_s – кількість розрахункових зрізів одного болта; d_b – зовнішній номінальний діаметр стержня болта (табл. Д.8 [1]); $\sum t$ – найменша сумарна товщина елементів, що зминаються в одному напрямку; γ_c – коефіцієнт умов роботи конструкції (табл.5.1 [1]).

Необхідна кількість болтів у з'єднанні за дії поздовжнього зусилля N , що проходить через центр ваги з'єднання, визначається як

$$n \geq N \gamma_n / N_{b,min} , \quad (3)$$

де $N_{b,min}$ – найменше із зусиль, що може бути сприйняте одним болтом у разі роботи на зріз або на зім'яття (1; 2); γ_n – коефіцієнт надійності за відповідальністю, який враховує ступінь відповідальності будівель і споруд (табл. [4]).

Згідно з європейськими нормами [2] у з'єднаннях, що працюють на зріз (з'єднання категорії А) розрахункове зусилля зсуву не повинно перевищувати несучої здатності на зріз та зсув, що визначаються за формулами:

а) у разі роботи на зріз

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}, \quad (4)$$

де для площини, що перетинає частину болта з різьбою $\alpha_v = 0,6$ і $\alpha_v = 0,5$ – для болтів класів міцності відповідно 4.6, 5.6; 8.8 та 4.8; 5.8; 10.9; $A = A_s$, тут A – площа поперечного перерізу стержня болта у частині без різьби, A_s – площа перерізу болта нетто; якщо площина зрізу не перетинає частину болта з різьбою, то $\alpha_v = 0,6$; f_{ub} – тимчасовий опір розтягу болтів; $\gamma_{M2} = 1,25$ – коефіцієнт безпеки для з'єднання;

б) у разі роботи на зім'яття

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}, \quad (5)$$

де $\alpha_b = \min \left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right)$ – для крайніх болтів;

$\alpha_b = \min \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right)$ – для середніх болтів;

$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$ – для крайніх болтів;

$k_1 = \min \left(1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$ – для середніх болтів;

f_u – тимчасовий опір розтягу; d – діаметр стержня болта; t – товщина елемента; d_0 – діаметр отвору для болта; e_1 ; e_2 ; p_1 ; p_2 – відстані під час розміщення болтів (рис. 1).

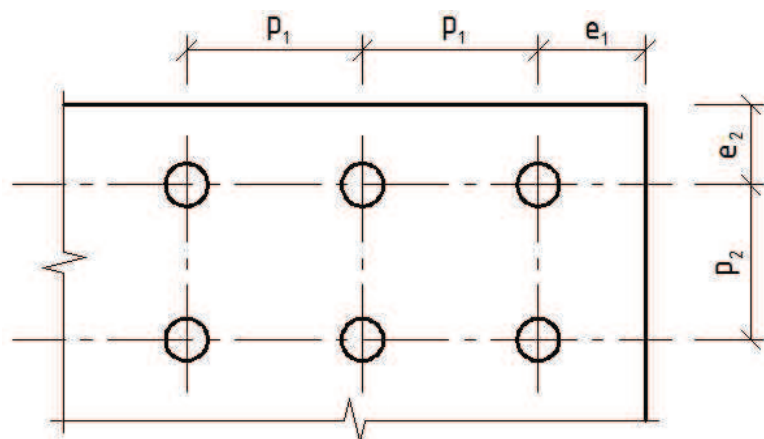


Рис. 1. Відстані для розміщення болтів за Eurocode 3

Болти у з'єднаннях розміщуються на певних відстанях вздовж та поперек дії зусилля відповідно до вимог норм [1,2].

З метою якісної оцінки розрахунків за різними нормами нижче виконано приклад розрахунку кріплення стінки прокатної балки до поперечного ребра жорсткості складеної балки, що використовується в балкових клітках нормального типу за сполучення їх в одному рівні.

Вихідні дані. Матеріал конструкцій: прокатна балка – сталь С235; складена балка – С245. Переріз прокатної балки – $\text{I}30/\text{ГОСТ 8239-89}$. Товщина поперечного ребра жорсткості складеної балки $t_r = 8,0 \text{ мм}$. Зусилля зсуву $N = 110 \text{ кН}$.

Розрахунок за ДБН В.2.6 – 198:2014

У разі сполученні балок в одному рівні (рис. 2) кріплення прокатної балки до поперечного ребра складеної балки відповідно до матеріалу конструкцій здійснюється болтами класу міцності 5.6 з розрахунковими опорами $R_{bs} = 210 \text{ МПа}$ і $R_{bp} = 475 \text{ МПа}$.

Товщина стінки прокатної балки $\text{I}30/\text{ГОСТ 8239-89}$ $t_w = 6,5 \text{ мм}$, товщина поперечного ребра жорсткості складеної балки $t_r = 8,0 \text{ мм}$. Для з'єднання елементів прийнято болти діаметром $d_b = 20 \text{ мм}$.

Несуча здатність одного болта:

а) на зріз

$$N_{bs} = R_{bs} A_b n_s \gamma_b \gamma_c = 210 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 10^{-1} = 59,35 \text{ кН};$$

б) на зім'яття

$$N_{bp} = R_{bp} d_b \sum t_{\min} \gamma_b \gamma_c = 475 \cdot 2 \cdot 0,65 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 10^{-1} = 55,58 \text{ кН},$$

де $A_b = 3,14 \text{ см}^2$ – площа поперечного перерізу болта діаметром $d_b = 20 \text{ мм}$ згідно з табл. Д.8 [2]; $n_s = 1$ – кількість площин зрізу одного звичайного болта; $\Sigma t_{min} = t_w = 6,5 \text{ мм}$ – менша з двох товщин елементів, що з'єднуються; $\gamma_b = 0,9$ – попередньо прийняте значення коефіцієнта умов роботи, оскільки його точне значення обчислюється з урахуванням розміщення болтів, яке ще не виконане; $\gamma_c = 1$ – коефіцієнт умов роботи (оскільки конкретні умови роботи конструкції не обумовлено).

Менша з несучих здатностей болта становить $N_{b,min} = 55,58 \text{ кН}$.

Необхідна розрахункова кількість болтів у з'єднанні

$$n \geq \frac{N \gamma_n}{N_{b,min}} = \frac{110 \cdot 0,95}{55,58} = 1,88,$$

де $\gamma_n = 0,95$ – коефіцієнт надійності за відповідальністю, який прийнято для усталеної розрахункової ситуації для класу відповідальності будівлі СС1 для категорії відповідальності конструкції В для розрахунку за граничними станами першої групи [3].

Кількість болтів у з'єднанні прийнято $n = 2$

Конструювання з'єднання, тобто призначення відстані між центрами болтів, а також від центрів болтів до краю елементів у напрямку та поперек дії зусилля виконується згідно з табл. 16.3 [2]. Оскільки у з'єднанні застосовано болти діаметром $d_b = 20 \text{ мм}$, то для класу точності болтів С згідно з вимогами табл. 16.3 [2] діаметр отвору прийнято $d = 23 \text{ мм}$.

Розрахункові розміри вздовж дії зусилля:

а) від центру отвору до краю елемента

$a = 1,5d \dots 4d$ (або $8t$) $= 1,5 \cdot 23 \dots 4 \cdot 23$ (або $8 \cdot 6,5$) $= 34,5 \dots 92$ (або 52 мм);
прийнято $a = 52 \text{ мм}$;

б) між центрами отворів

$s = 2d \dots 8d$ (або $12t$) $= 2 \cdot 23 \dots 8 \cdot 23$ (або $12 \cdot 6,5$) $= 46 \dots 184$ (або 78 мм); прийнято $s = 78 \text{ мм}$.

Розрахунковий розмір від центру отвору до краю елемента поперек дії зусилля

$b_1 = 1,2d \dots 4d$ (або $8t$) $= 1,2 \cdot 23 \dots 4 \cdot 23$ (або $8 \cdot 6,5$) $= 27,6 \dots 92$ (або 52 мм); прийнято $b_1 = 45 \text{ мм}$.

Висота стінки балки у місці кріплення до поперечного ребра жорсткості головної балки

$$h_{w_1} = h - 2(t_f + R) = 30 - 2(1,02 + 1,2) = 25,56 \text{ см} \approx 256 \text{ мм}$$

і тому розмістити болти на відстанях, обчислених вище, неможливо, оскільки фактична відстань між центрами болтів у разі використання двох болтів становить

$$s_{факт} = h_w - 2a = 25,6 - 2 \cdot 5,2 = 15,2 \text{ см},$$

що перевищує максимальну з розрахунку $s = 78 \text{ мм}$. Тому, з метою виконання вимог норм проектування [2], кількість болтів для кріплення приймається $n = 3$ (рис. 3).

Тоді відстань між центрами болтів вздовж дії зусилля

$$s_{факт} = (h_{w_1} - 2a) / 2 = (25,6 - 2 \cdot 5,2) / 2 = 7,6 \text{ см} < s = 7,8 \text{ см}.$$

Прийнято $s_{факт} = 7,6 \text{ см} = 76 \text{ мм}$.

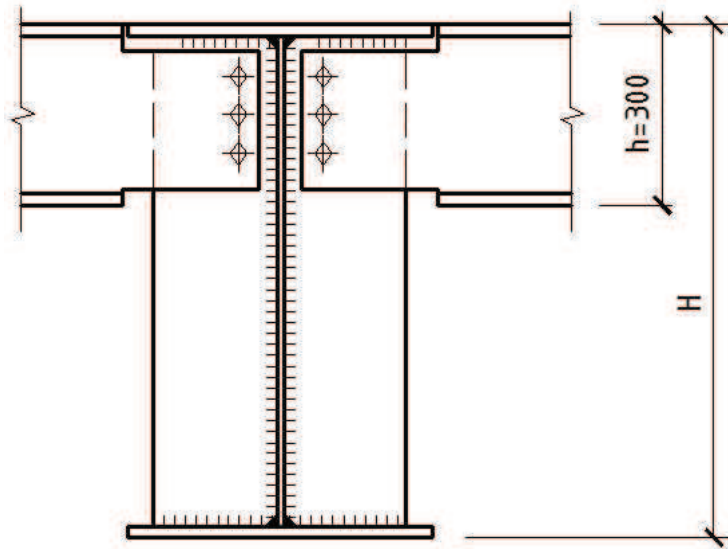


Рис. 2. Загальний вигляд кріплення прокатної балки до поперечного ребра жорсткості складеної балки

Точне значення коефіцієнта γ_b обчислюється згідно з табл. 16.4 [2]:

а) для зрізу багатоболтового з'єднання $\gamma_b = 1,0$;

б) для зм'яття багатоболтового з'єднання

$$\gamma_b = 0,4a/d + 0,2 = 0,4 \cdot 52/23 + 0,2 = 1,104 \text{ або}$$

$$\gamma_b = 0,4s/d = 0,4 \cdot 76,8/23 = 1,336.$$

З двох значень коефіцієнта γ_b для зм'яття приймається менше $\gamma_b = 1,104$. Відповідно до прим. 1 табл. 16.4 [2] остаточно для зрізу $\gamma_b = 1,0 \cdot 0,9 = 0,9$, а для зм'яття $\gamma_b = 1,104 \cdot 0,9 = 0,994$. Оскільки

$\gamma_b = 0,994$ більше за попередньо прийняте значення $\gamma_b = 0,9$, то перерахунок несучої здатності болтів не виконується.

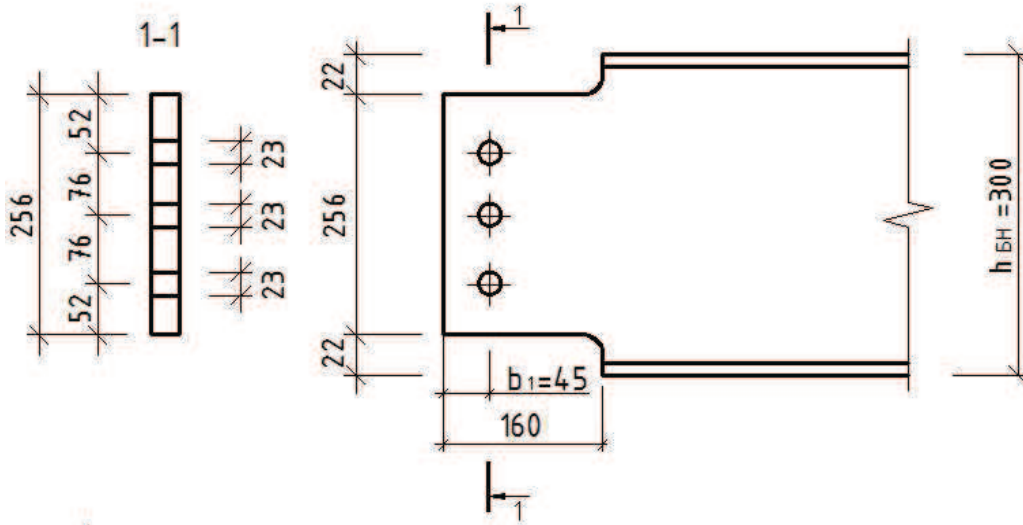


Рис. 3. Опорна частина прокатної балки

Розрахунок за Eurocode 3

Несуча здатність одного болта:

а) на зріз

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 3,14 \cdot 10^{-1}}{1,25} = 75,36 \text{ кН};$$

б) на зім'яття

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 500 \cdot 2 \cdot 0,65 \cdot 10^{-1}}{1,25} = 130 \text{ кН},$$

де $k_1 = 2,5$ і $\alpha_b = 1$ – коефіцієнти, значення яких прийнято орієнтовно, оскільки на даному етапі розрахунку відсутнє розміщення болтів у з'єднанні; $f_{ub} = 500 \text{ МПа}$ [2]; $f_u \approx 500 \text{ МПа}$ [4].

Менша з несучих здатностей болта становить $F_{Rd, min} = 75,36 \text{ кН}$.

Необхідна розрахункова кількість болтів у з'єднанні

$$n \geq \frac{N}{F_{Rd, min}} = \frac{110}{75,36} = 1,46.$$

Кількість болтів у з'єднанні прийнято $n = 2$ Діаметр отвору прийнято $d = 23 \text{ мм}$.

Розрахункові мінімальні розміри у з'єднанні (згідно з рис. 1):

$$e_1 = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 23 = 27,6 \text{ мм}, \quad p_1 = 2,2 d_0 = 2,2 \cdot 23 = 50,6 \text{ мм};$$

$$e_2 = 1,2 d_0 = 1,2 \cdot 23 = 27,6 \text{ мм}, \quad p_2 = 2,4 d_0 = 2,4 \cdot 23 = 55,2 \text{ мм}.$$

Розрахункові максимальні розміри у з'єднанні (згідно з рис. 1):

$$e_1 = e_2 = 4 t + 40 \text{ мм} = 4 \cdot 6,5 + 40 \text{ мм} = 47 \text{ мм},$$

$$p_1 = p_2 = 14 t \text{ (або } 200 \text{ мм)} = 14 \cdot 6,5 = 91 \text{ мм (або } 200 \text{ мм)}.$$

Як і в розрахунку за національними нормами [1], у даному з'єднанні для виконання вимог європейських норм [2] необхідно використовувати ту саму кількість болтів, розміщених практично на тих самих відстанях, а саме

$$e_1 = e_2 = 45 \text{ мм}, \quad p_1 = 83 \text{ мм}.$$

З урахуванням фактичного розміщення болтів остаточне значення коефіцієнта α_b приймається за меншим зі значень:

$$\alpha_b = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{45}{3 \cdot 23} = 0,652;$$

$$\alpha_b = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{83}{3 \cdot 23} - \frac{1}{4} = 0,953.$$

Фактичне значення коефіцієнта k_1 не змінюється, оскільки попередньо прийняте значення

$$k_1 = 2,5 < 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{45}{23} - 1,7 = 3,79.$$

Фактична несуча здатність болта на зім'яття

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,652 \cdot 500 \cdot 2 \cdot 0,65 \cdot 10^{-1}}{1,25} = 84,76 \text{ кН}.$$

Висновки. Аналіз наведених формул національних і європейських норм та виконаних за ними розрахунків дозволяє зробити декілька висновків, основними з яких є:

1) на відміну від національних норм у європейських застосовується один коефіцієнт безпеки з'єднання $\gamma_{M2} = 1,25$, числове значення якого рекомендується застосовувати без обґрунтування, у той час як національними нормами передбачено використання коефіцієнтів γ_b , γ_c і γ_n , значення кожного з яких має певні обґрунтовані величини;

2) європейськими нормами, на відміну від національних, дозволяється застосовувати з'єднання, у яких розрахункова площа зрізу перетинає частину болта з різьбою;

3) у розрахунку несучої здатності болта на зріз (4) використовується значення тимчасового опору болта розтягу f_{ub} , у той час як у (1)

застосоване значення R_{bs} – розрахунковий опір болта зрізу, що є, вочевидь, більш обґрунтованим ніж урахування роботи болта на зріз введенням у розрахункову формулу коефіцієнта α_v ;

4) обчислення несучої здатності болта на зріз у нормах [2] виконується без урахування коефіцієнта умов роботи з'єднання і її величина у 1,27 рази перевищує значення, обчислене за нормами [1], що свідчить про суттєве заниження національними нормами значення розрахункового опору болта зрізу і про недостатність врахування несучої здатності болта на зріз коефіцієнтом умов роботи болтового з'єднання γ_b ;

5) обчислення несучої здатності болта на зім'яття у нормах [2] дає суттєве збільшення значення понад у 2,3 рази порівняно з нормами [1], хоча у подальшому після виконання конструювання з'єднання це значення суттєво зменшується, але тим не менше в остаточному результаті перевищує аналогічне значення у 1,52 рази.

1. Сталеві конструкції : ДБН В.2.6 – 198: 2014. – Офіц вид. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 199 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).

2. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-8:2005.

3. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – Офіц вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).

4. Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. The European Standard EN 10025-2:2004.

1. Stalevi konstruktsiyi : DBN V.2.6 – 198: 2014. – Ofits. vyd. – K. : DP «Ukrarkhbudinform», 2014. – 199 s. (Normatyvnyy dokument Minrehionbudu Ukrayiny. Normy proektuvannya).

2. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-8:2005.

3. Zahal'ni pryntsy py zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel', sporud, budivel'nykh konstruktsiy ta osnov: DBN V.1.2-14-2009. – Of its. vyd. – K. : Minrehionbud Ukrayiny, 2009. – 37 s. (Normatyvnyy dokument Minrehionbudu Ukrayiny. Normy proektuvannya).

4. Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels. The European Standard EN 10025-2:2004.