

Ю.Ю. Солодовник

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ Т-ПОДІБНОГО КОМПОНЕНТУ РОЗТЯГНУТОЇ ЗОНИ ФЛАНЦЕВОГО ВУЗЛОВОГО З'ЄДНАННЯ БАЛКИ З КОЛОНОЮ

Аналіз сталевих конструкцій на сучасному рівні вимагає від фахівця досконалого розуміння їх роботи. Актуальні в Україні державні будівельні норми регламентують розрахунок елементів сталевих конструкцій за межами пружної роботи сталі, але не містять чітких вказівок щодо розрахунку вузлових з'єднань. У даній статті представлена спрощена математична модель т-подібного компонента розтягуючої зони фланцевого з'єднання балки з колоною, що розроблена на базі «компонентного методу».

Ключові слова: фланцеве з'єднання, математична модель, т-подібний компонент, болтове з'єднання.

Постановка проблеми

Поєднання простих технологій виготовлення та швидкого монтажу зробило фланцеві з'єднання одними із найпопулярніших вузлових з'єднань елементів сталевих рамних конструкцій. Незважаючи на простоту у використанні, фланцеві з'єднання надзвичайно складні за своїм аналізом і поведінкою. Це питання є предметом досліджень багатьох вчених в галузі металоконструкцій, оскільки суттєво впливає на розрахункову схему конструкції в цілому, а також на її економічну ефективність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дуже важливо вміти діагностувати реальну загальну поведінку з'єднань балки з колоною на основі їхніх геометричних і механічних властивостей. Цього можна досягти за допомогою «компонентного методу», запропонованого в роботах [1-9], і на якому базуються норми

проектування сталевих конструкцій ЕС3 [10]. Як слушно зазначають автори [11, 12], це питання на сьогодні є досить актуальним.

Сутність «компонентного методу» полягає в розгляді будь-якого з'єднання, як сукупності окремих основних компонентів [9]. Як свідчить досвід проектування будівель адміністративного та офісного призначення, найбільш розповсюдженою топологією вузлового з'єднання є таке, що зображено на рис. 1, та конструктивно представляє собою приєднання балки до колони за допомогою фланця на високоміцних болтах. У представленому рішенні вузлового з'єднання балки із колоною за методикою розрахунку, що наведені в нормах ЕС3 [10], в зоні розтягування можна виділити наступні компоненти: фланець при згинанні, торець колони при згинанні та болти при розтягуванні. Усі ці елементи моделюються з двох т-подібних компонентів, що з'єднані через фланець за допомогою болтів.

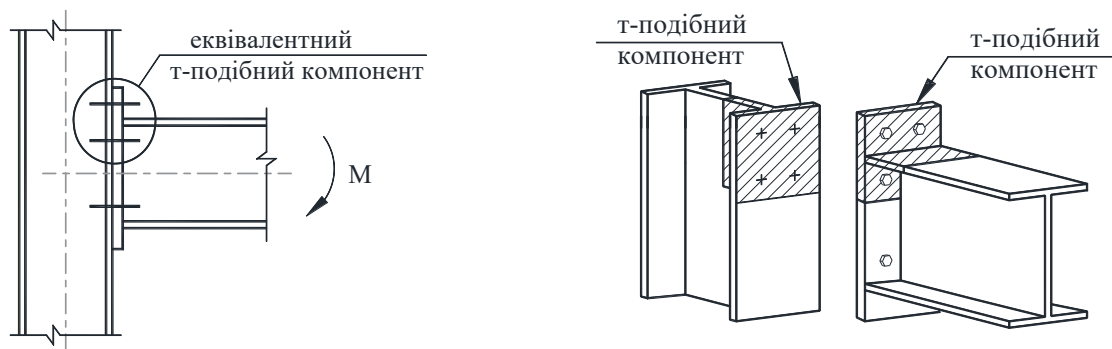
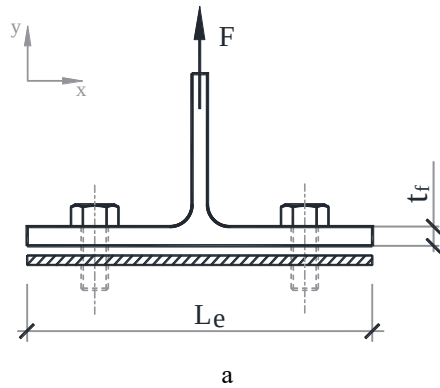


Рис. 1. Фланцеве вузлове з'єднання балки з колоною за допомогою болтів з виділенням зони т-подібного компонента.

Формування мети статті

Метою статті є аналітичне дослідження напружено-деформованого стану розтягнутої зони фланцевого вузлового з'єднання балки з колоною. Аналіз можливих сценаріїв переходу компонента у граничний стан дозволить запропонувати зв'язок між зовнішніми зусиллями та деформаціями компонента як в пружній стадії роботи, так і за її межами.



Виклад основного матеріалу

З метою дослідження напружено-деформованого стану т-подібного компонента (рис. 2) пропонується спрощена математична модель, яка враховує роботу матеріалу за межами пружності та дозволяє дослідити її напружено-деформований стан.

Розглядається т – компонент (рис. 2а), його основні параметри наведені на рис. 2б.

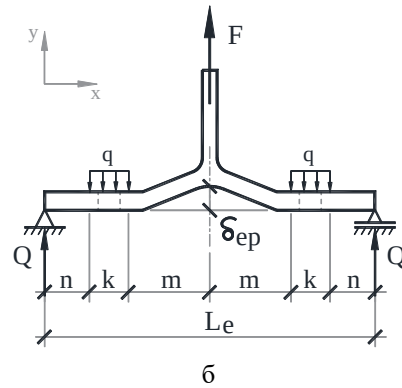


Рис. 2. Т-подібний компонент вузлового з'єднання: а – загальний вигляд т-подібного компонента, б – розрахункова схема (n, m, k – геометричні характеристики, q – напруження від болтів, Q – важільна сила, F – зусилля розтягу, L_e – ефективна (розрахункова) довжина, δ_{ep} – пружно-пластична деформація).

Деформація еквівалентного т-подібного з'єднання може бути викликана пружними та пластичними деформаціями поясу колони, опорного фланця та відповідним деформаціям болтів. На рис. 2 показана схема визначення ефективної довжини у відповідності до [13]. Слід зазначити, що дана схема дещо відрізняється від прийнятої у ЕС3. Однак, як показали дослідження авторів [13], значення розрахункової довжини достатньо близькі по значенню, що визначається у відповідності до ЕС3 [10].

У відповідності до рис. 2б розглянемо три ділянки т-подібного компонента:

- 1) $0 \leq x \leq n$;
- 2) $n \leq x \leq (n + k)$;
- 3) $(n + k) \leq x \leq (n + k + m)$.

$$EIv'' = Qx = qkx - \frac{Fx}{2}, \quad (1)$$

для першої ділянки;

$$EIv'' = Qx - \frac{q(x-n)^2}{2} = qkx - \frac{Fx}{2} - \frac{q(x-n)^2}{2}, \quad (2)$$

для другої ділянки;

$$EIv'' = Qx - qk \left[x - \left(n + \frac{k}{2} \right) \right] = qkx - \frac{Fx}{2} - qk \left[x - \left(n + \frac{k}{2} \right) \right], \quad (3)$$

для третьої ділянки.

Двічі інтегруючи для трьох ділянок т-подібного компонента, запишемо наступні вирази:

$$EIv = \int \left(\frac{qkx^2}{2} - \frac{Fx^2}{4} + C_1 \right) dx = \frac{qkx^3}{6} - \frac{Fx^3}{12} + C_1x + C_4, \quad (4)$$

$$EIv = \int \left(\frac{qkx^2}{2} - \frac{Fx^2}{4} - \frac{q(x-n)^3}{2} + C_2 \right) dx = \frac{qkx^3}{6} - \frac{Fx^3}{12} - \frac{q(x-n)^4}{24} + C_2x + C_5, \quad (5)$$

$$EIv = \int \left(\frac{qkx^2}{2} - \frac{Fx^2}{4} - \frac{qk \left[x - \left(n + \frac{k}{2} \right) \right]^2}{2} + C_3 \right) dx = \frac{qkx^3}{6} - \frac{Fx^3}{12} - \frac{qk \left[x - \left(n + \frac{k}{2} \right) \right]^3}{6} + C_3x + C_6, \quad (6)$$

де E – модуль пружності;

v – прогин на відстані x ;

$C_1 \dots C_6$ – постійні інтегрування. Отримані шість постійних інтегрування можна визначити з використанням наступних граничних умов:

- 1) при $x = 0$, $v = 0$;
- 2) при $x = n$ та $x = (n + k)$, взаємний кут повороту та зміщення суміжних ділянок повинен бути однаковий;

$$\delta_{ep} = \frac{FL_e^3}{48EI} - \frac{qk}{EI} \left[\frac{L_e^3}{24} + \frac{\left(m + \frac{k}{2}\right)^3}{6} - \frac{\left(m + \frac{k}{2}\right)^2 L_e}{4} - \frac{k^2 \left(n + \frac{k}{2}\right)}{24} \right], \quad (7)$$

де k – модуль Юнга;

qk – зусилля у болтах;

F – розтягуюче зусилля;

n, k, m – параметри за рис. 2б;

$I = \frac{2L_e t_f^3}{12}$ – момент інерції;

L_e – ефективна ширина.

- 3) при $x = (n + k + m)$, кут повороту дорівнює нулю.

Використовуючи сформульовані граничні умови, та визначивши постійні інтегрування $C_1 \dots C_6$, переміщення δ_{ep} при $x = (n + k + m)$ визначаються виразом:

Для використання отриманої залежності, зусилля в болтах qk запишемо через розтягуювальну силу F . Виходячи із умов сукупності деформацій при значенні $x = \left(n + \frac{k}{2}\right)$ подовження шпильки болта повинно бути рівним переміщенню фланця.

Переміщення фланця при $x = \left(n + \frac{k}{2}\right)$ запишемо у наступному вигляді:

$$\delta_{bl} = \frac{F}{EI} \left[\frac{\left(n + \frac{k}{2}\right) L_e^2}{16} - \frac{\left(n + \frac{k}{2}\right)^3}{12} \right] + \frac{qk}{EI} \left[\frac{\left(n + \frac{k}{2}\right)^3}{6} + \frac{k^2 \left(n + \frac{k}{2}\right)}{24} + \frac{\left(n + \frac{k}{2}\right) \left(m + \frac{k}{2}\right)^2}{2} - \frac{\left(n + \frac{k}{2}\right) L_e^2}{8} - \frac{k^3}{384} \right], \quad (8)$$

Вираз для подовження шпильки болта має вигляд:

$$\delta_{b2} = \frac{qk L_b}{E_b A_s}, \quad (9)$$

де L_b – ефективна (розрахункова) довжина болта;

E_b – модуль пружності болта;

A_s – площа перерізу.

Проаналізувавши отримані вирази, отримаємо такий вид формули:

$$qk = \frac{\frac{F}{EI} \left[\frac{\left(n + \frac{k}{2}\right) L_e^2}{16} - \frac{\left(n + \frac{k}{2}\right)^3}{12} \right]}{\frac{L_b}{E_b A_s} - \frac{1}{EI} \left[\frac{\left(n + \frac{k}{2}\right)^3}{6} + \frac{k^2 \left(n + \frac{k}{2}\right)}{24} + \frac{\left(n + \frac{k}{2}\right) \left(m + \frac{k}{2}\right)^2}{2} - \frac{\left(n + \frac{k}{2}\right) L_e^2}{8} - \frac{k^3}{384} \right]}. \quad (10)$$

Вичерпання несучої здатності т – подібного компонента може проходити за трьома сценаріями (рис. 3) в залежності від розмірів його окремих елементів (товщина фланця, діаметр болтів), а саме:

1. Утворення шарнірів пластичності.
2. Пластичний шарнір, перехід у стан текучості болтів.
3. Розрив болта.

Наступним етапом є визначення максимального (граничного) зусилля F та положення першого шарніру пластичності. Формування першого шарніру пластичності

відбудеться в тому випадку, коли фактичні значення згинального моменту в поясі перевищать пластичний момент, що визначається відповідно до виразу:

$$M_p = \frac{(2L_e) f_y \cdot t_f^2}{4}, \quad (11)$$

де f_y – межа текучості матеріалу фланця;

t_f – товщина фланця;

L_e – ефективна довжина за рис. 2б.

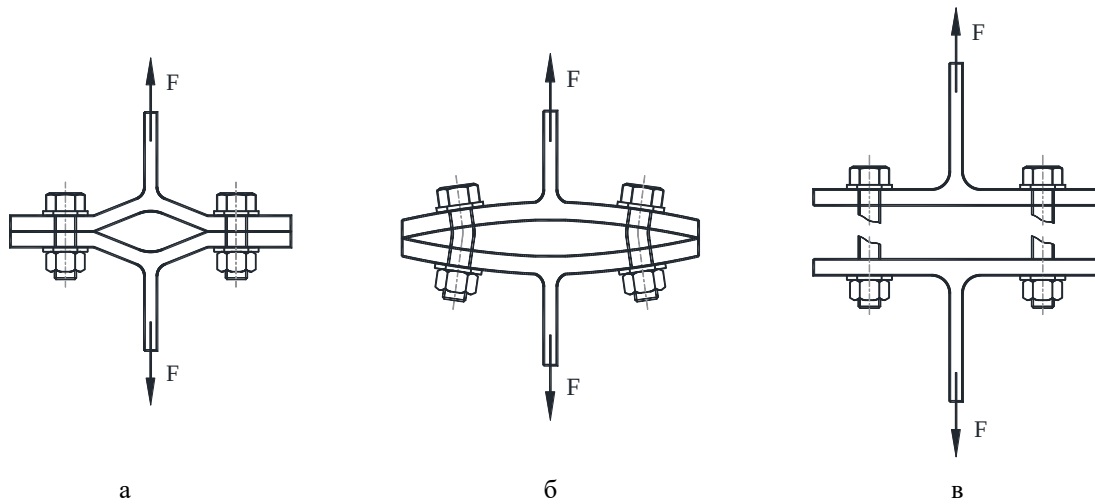


Рис. 3. Види деформацій компонентів у відповідності до EC3 [10] (а – механізм роботи, сценарій 1; б – механізм роботи, сценарій 2; в – механізм роботи, сценарій 3).

Зусилля формування першого шарніру пластичності приймається як мінімальне значення, що визначається із умов:

- момент в середині т-подібного компоненту
 $x = (n + k + m)$;

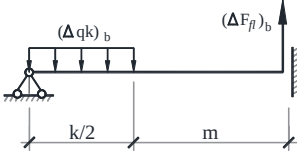
- момент за центральною лінією болтів
 $x = (n + \frac{k}{2})$;

- зусилля виходячи із точіння болтів.

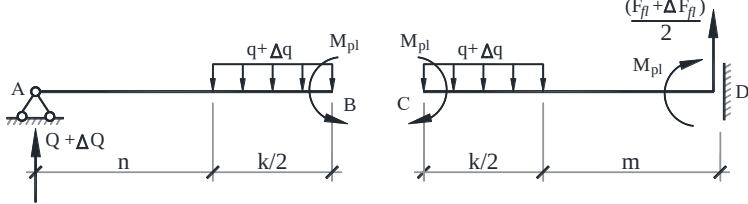
В табл. 1 представлені можливі сценарії переходу до граничного стану компонентів вузлового з'єднання.

Таблиця 1

Сценарії переходу до граничного стану

Механізм 1	Болти переходять у стан текучості після формування першого пластичного шарніру. $x = (n + k + m)$.	Загальне розтягуюче зусилля: $F_{lb} = (F_{fl} + \Delta F_{fl}) = \frac{2M_p + \sum(qk + \Delta qk)(n + \frac{k}{2})}{(n + k + m)}.$ Повне зусилля у болтах: $(qk)_b = qk + \Delta qk = \frac{\frac{(F_{fl} + \Delta F_{fl})}{2}(n + k + m) - M_p}{n + \frac{k}{2}}.$ $\checkmark (\delta_{ep})_b = (\delta_{ep} + \Delta \delta_{ep}) = \frac{(qk + \Delta qk)}{EI} \left[\frac{(n + k + m)^3}{6} - \frac{(m + (\frac{k}{2})^3)}{6} \right] - \frac{(F_{fl} + \Delta F_{fl})}{2EI} \frac{(n + k + m)^3}{6} + \frac{A(n + k + m)}{EI} + \frac{B}{EI};$ $\checkmark (\delta_{bl})_b = \delta_{bl} + \frac{\Delta qk L_b}{E_b A_s}.$
	Деформація болтів після пластичної стадії роботи.	 $(\Delta qk)_b = \frac{(\Delta F_{fl})_b}{2} = 2A_s f_{bu} - (qk)_b.$ $\checkmark (\Delta \delta_{ep})_b = \frac{(\Delta F_{fl})_b}{2} \left[\frac{(m + (\frac{k}{4})^2)(m + \frac{k}{2})}{8} - \frac{m + (\frac{k}{4})^3}{24} + \frac{k^3}{1536} + \frac{E L_b}{2 E_{tb} A_s} \right],$ де $E_{tb} = 0.001 E_b$ – дотичний модуль пружності матеріалу болтів.

Продовження табл. 1

Механізм 2	Утворення шарнірів пластичності по осі болтів. $x = (n + \frac{k}{2})$	 $\Delta qk = \frac{\Delta F_{fl}}{2} \left[\frac{(m + \frac{k}{2})}{(n + \frac{k}{2})} + 1 \right]$ $\checkmark \delta_{bl} = \frac{\Delta qk L_b}{E_b A_s},$ $\checkmark \Delta \delta_{ep} = \frac{\Delta Q}{EI} \left[\frac{(n+k+m)^3}{6} \right] - \frac{\Delta qk (m + \frac{k}{2})^3}{EI} + \frac{C(n+k+m)}{EI} + \frac{D}{EI}.$
	Перехід у стан текучості болтів після формування другого шарніра пластичності.	$(\Delta qk)_f = \frac{(\Delta F_{fl})_f}{2} = 2A_s f_{by} - (qk)_f.$ Повне значення розтягувальної сили: $(F_{fl})_b = (F_{fl})_f + (\Delta F_{fl})_f.$ $\checkmark (\Delta \delta_{ep})_f = \frac{(\Delta F_{fl})_f}{E_t I} \left[\frac{(m + \frac{k}{4})^2 (m + \frac{k}{2})}{8} - \frac{(m + \frac{k}{4})^3}{24} + \frac{k^3}{1536} + \frac{E_t I L_b}{2E_b A_s} \right],$ де E_t – дотичний модуль пружності матеріалу фланця.
Механізм 3	Перехід у пластичний стан та руйнування болтів.	У відповідності до норм [10].

Висновки

На підставі проведених досліджень запропонована аналітична модель т-подібного компоненту, яка дозволяє визначити його несучу здатність із урахуванням можливих сценаріїв переходу до граничного стану, а також здійснити оцінку відповідних деформацій. В подальшому передбачається чисельно - експериментальна перевірка запропонованої моделі.

Література

- Boracchini, A. Design and analysis of connections in steel structures [Текст] / Alfredo Boracchini - Ernst&Sohn, 2018.
- Joints in steel construction. Moment - resisting joints to Eurocode 3 [Текст] / The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association, 2013. - 172 p.
- Bernuzzi, C. Structural steel design to Eurocode 3 and AISC Specifications [Текст] / C. Bernuzzi, B. Cordova - John Wiley & Sons, 2016.
- Kozlovski, A. Estimation of the initial stiffness and moment resistance on steel and composite joints [Текст] / A. Kozlovski, R. Kowalczyk, M. Gizejowski - CTUBH 8-th World congress, 2008. - p 1-7.
- Graham, W. Structural Steelwork Connections [Текст] / Graham W Owens & Brian D Cheal - Butterworth-Heinemann, 1989. - 336 p.
- Joints in Steel Construction. Moment connections [Текст] / The Steel Construction Institute. 239 p.
- Jaspart, J.P. Design of joints in steel and composite structures [Текст] / J.P. Jaspart, K. Weynand - Ernst&Sohn, 2018.
- Ana M.Girao Coelho. Finite - element modeling of the nonlinear behavior of bolted T-stub connections [Текст] / Ana M.Girao Coelho, Luis Simoes da Silva, Frans S.K. Bijlaard. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:6(918).
- Jaspart, J.P. Derivation of the joint properties by means of the component method [Текст] / Jaspart J.P, Anderson A. & Steenhuis M - Proceedings of the Liège COST C1 conference of semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections Brussels, September 1998.
- Eurocode 3. EN1993-1-8. Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints [Текст] / CEN, Brussels, 2005.
- Perelmuter Anatolii. Designing bolted end-plate connections in compliance with Eurocode and Ukrainian codes: consistency and contradictions. [Текст] / Anatolii Perelmuter, Eduard Kriksunov, Igor Gavrilenko, Vitalina Yurchenko. // Modern building materials, structures and techniques – 2010. - The 10th International Conference, p 733-743.
- Солодовник Ю.Ю. Розрахунок несучої здатності вузлів сталевих конструкцій на основі компонентного методу. [Текст] / Солодовник Ю.Ю., Рюмін В.В., Нікічанов В.В. // Науково-технічний збірник "Комунальне господарство міст" – 2021р. - Т.1 випуск №161, Харків, - С. 19-24. - Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-19-24>.
- Faella C. Experimental Analysis of Bolted Connections: Snug Versus Preloaded Bolts [Текст] / Faella C., Piluso V.,

Rizano G. // *Journal of Structural Engineering* - 1998. - Vol 124 №7, - pp 765-774.

References

1. Alfredo Boracchini (2018). Design and analysis of connections in steel structures. *Ernst&Sohn*.
2. Joints in steel construction (2013). Moment - resisting joints to Eurocode 3. *The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association*), 172 p.
3. Bernuzzi, C., Cordova B. (2016). Structural steel design to Eurocode 3 and AISC Specifications. *John Wiley & Sons*.
4. Kozlovski, A., Kowalczyk R., Gizejowski M. (2008). Estimation of the initial stiffness and moment resistance on steel and composite joints. *CTUBH 8-th World congress* p1-7.
5. Graham W Owens & Brian D Cheal (1989). Structural Steelwork Connections. *Butterworth-Heinemann*, 336 p.
6. Joints in Steel Construction. Moment connections. The Steel Construction Institute, 239 p.
7. Jaspart J.P., Weynand K. (2018). Design of joints in steel and composite structures. *Ernst&Sohn*.
8. Ana M. Girao Coelho, Luis Simoes da Silva, Frans S.K. Bijlaard (2006). Finite – element modeling of the nonlinear behavior of bolted T-stub connections. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:6(918).
9. Jaspart J.P., Anderson A. & Steenhuis M. (1998). Derivation of the joint properties by means of the component method. *Proceedings of the Liège COST C1 conference of semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections Brussels, September*.
10. Eurocode 3 (2005). EN1993-1-8. Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints. *CEN, Brussels*.
11. Perelmutter Anatolii, Kriksunov Eduard, Gavrilenko Igor, Vitalina Yurchenko. (2010). Designing bolted end-plate connections in compliance with Eurocode and Ukrainian codes: consistency and contradictions. *Modern building materials, structures and techniques. The 10th International Conference*, p 733-743.
12. Solodovnyk Y., Riumin V., Nikichanov V. (2021). Evaluation of load-bearing capacity of the steel construction joints on the basis of component method. *Scientific and technical journal "Municipal economy of cities "*. Vol 1 №161, p. 19-24. <http://dx.doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-19-24>.
13. Faella C., Piluso V., Rizano G. (1998). Experimental Analysis of Bolted Connections: Snug Versus Preloaded Bolts. *Journal of Structural Engineering*. Vol 124 №7, pp 765-774.

Рецензент: д-р техн. наук, доцент А.О. Мозговий, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: СОЛОДОВНИК Юлія Юріївна
аспірантка кафедри будівельного проектування
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова
E-mail - solladesign@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5243-9993>

ANALYTICAL MODEL OF THE T- STUB COMPONENT IN THE END-PLATE BOLTED CONNECTION OF THE BEAM TO THE COLUMN IN TENSION

Y. Solodovnyk

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

End plated connections of metal structures are quite relevant and are usually used in office, commercial, and commercial-office buildings. It is very important to be able to diagnose the real general behavior of beam-to-column connections based on their geometric and mechanical properties. Therefore, the analysis of steel structures at the modern level requires a specialist to have a thorough understanding of their work, as well as the calculation provisions laid down in current design codes. In contrast to Eurocode 3 design codes, the current Ukrainian state building regulations do not contain clear instructions on the beam to column joint calculation and do not even give a clear definition of the concept of steel joint and steel connection. It should be noted that the beam to column connection is the most responsible area that requires special attention, as it significantly affects the design scheme of the structure, as well as its economic efficiency.

By using the semi-rigid connection concept, weight savings of up to 20% can be achieved. In the presented article, a simplified mathematical model of the t-stub component of the tensile zone of the semi-rigid bolted connection of the beam to the column was developed using the component method. In the given solution of the connection in the tension zone, the following components were distinguished: the flange in bending, the end of the column in bending, and the bolts in tension. All these elements were modeled from two t- stub components connected through an end plate with the help of bolts. A design scheme for determining the stress-strain state was proposed. The analysis of the exhaustion of the bearing capacity of the t- stub component was performed according to three scenarios depending on the size of its individual elements (end plate thickness, bolt diameter). The obtained results will make it possible to determine the bearing capacity with possible variations of the transition to the limit state, as well as to estimate the deformations of the considered component of the connection.

Keywords: end-plate connection, mathematical model, T-stub component, bolt connection.