**УДК 624.078** **DOI 10.33042/2522-1809-2021-1-161-19-24**

**Ю.Ю. Солодовник, В.В. Рюмін, В.В. Нікічанов**

*Харківський національний університет будівництва та архітектури, Україна*

# РОЗРАХУНОК НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ВУЗЛІВ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ КОМПОНЕНТНОГО МЕТОДУ

*Відсутність в діючих нормах сталевих конструкцій відомостей щодо розрахунків вузлів сталевих конструкцій призводить до певних ускладнень при прийнятті проектних рішень. На підставі компонентного методу, який закладено в норми проектування Єврокоду 3, було проведено оцінку несучої здатності вузлового з'єднання балки з колоною. Порівняння результатів аналітичних розрахунків із результатами, отриманими за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, показало їх високу відповідність. Одночасно слід зазначити, той факт, що алгоритм розрахунків, представлений у нормах Єврокоду 3, вимагає від вітчизняного проектувальника значних витрат часу, а також обізнаності із особливостями проектування вузлів сталевих конструкцій, прийнятих в країнах ЄС.*

***Ключові слова:*** *сталеві конструкції, компонентний метод, несуча здатність.*

## Постановка проблеми

Характеристика роботи вузлів по жорсткості, несучій здатності і здатності до розвитку пластичних деформацій – є ключовим аспектом при проектуванні об'єктів будівництва із застосуванням сталевих конструкцій [1–6] . Ці характеристики можуть бути визначені в ході експериментальних досліджень, чисельних досліджень з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, аналітичних розрахунків [7–10].

Аналітичний підхід є найбільш прийнятним з погляду повсякденної проектної практики, і дозволяє встановити характеристики вузла на підставі механічних і геометричних властивостей окремих компонентів вузла.

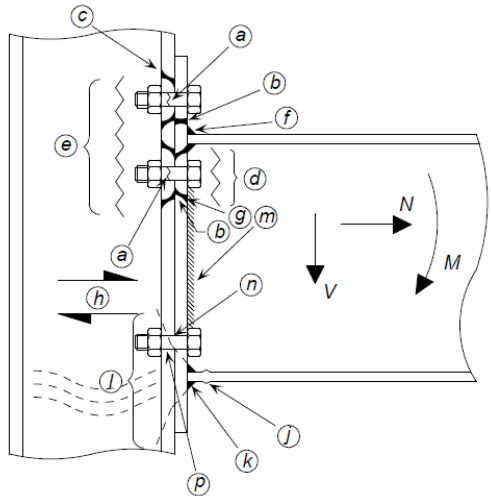
## Аналіз останніх досліджень і публікацій

У нормах ЄС3 [10] в основу класифікації і розрахунку вузлів сталевих конструкцій покладено «компонентний метод», який в даний час є загальновизнаним у світовій практиці [11, 12].

В даній роботі здійснити оцінку несучої здатності вузлового з'єднання на підставі використання компонентного методу із порівнянням отриманих результатів з результатами, отриманими за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

## Виклад основного матеріалу

У відповідності до компонентного методу вузол розглядається як набір окремих базових компонентів (рис. 1), кожен з яких володіє своїми власними характеристиками жорсткості і міцності в умовах розтягування, стиснення і зсуву.




b - опорний фланець при згині;
c - полиця колони при згині;
d - стінка балки при розтягуванні;
e - стінка колони при розтягуванні;
f - зварні шви опорного фланця з боку полиці балки в розтягнутій зоні;
g - зварні шви опорного фланця з боку стінки балки;
h - стінка колони при зсуві;
j - пояс балки при стисканні;
k - зварні шви опорного фланця з боку полиці балки в розтягнутій зоні;
l - стінка колони в стиснутій зоні;
m - зварні шви опорного фланця з боку стінки балки;
n - болти в умовах зрізу;
p - болти в умовах зім'яття;

Рис. 1. Основні компоненти вузла у відповідності до вказівок норм ЄС3

© Солодовник Ю.Ю., Рюмін В.В., Нікічанов В.В. 

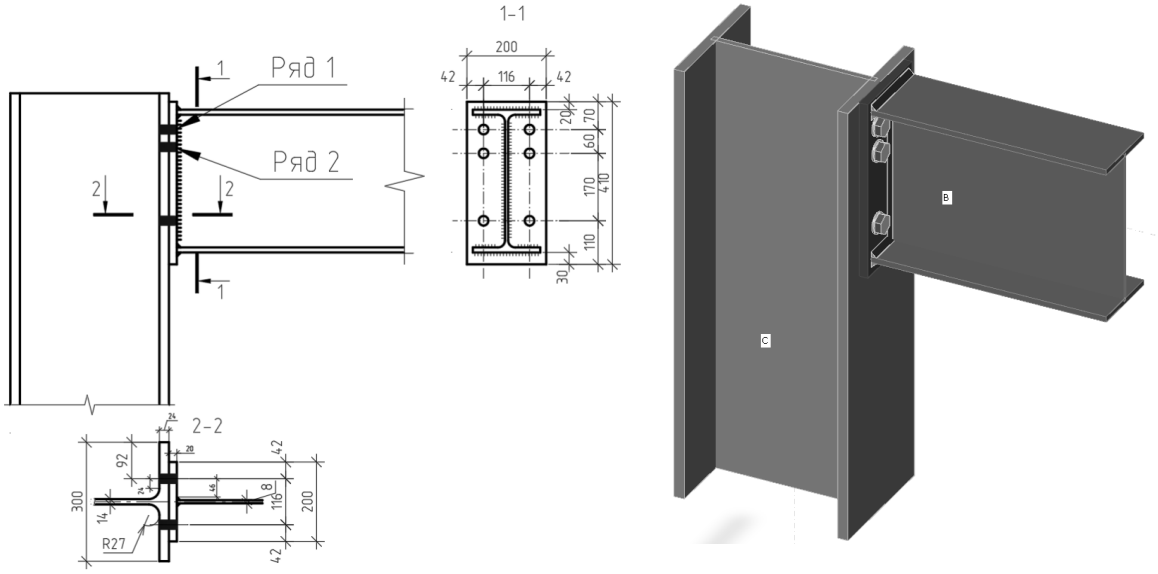
Застосування компонентного методу включає в себе наступні етапи:

1) етап ідентифікації активних компонентів вузла;

2) етап визначення характеристик жорсткості та міцності кожного окремого компонента вузла;

3) етап збірки, на якому визначаються характеристики жорсткості і міцності вузла в цілому.

Розглянемо застосування компонентного методу при визначенні несучої здатності вузла, що представлений на рис. 2.




*а* *б*

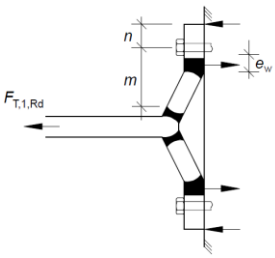
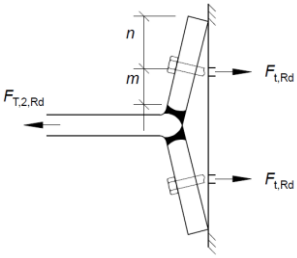
Рис. 2. Конструктивне рішення вузлового з'єднання
(а – графічне зображення вузла; б – модель вузлового з'єднання).

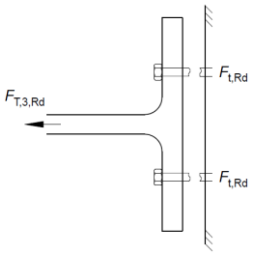
Несуча здатність кожного активного компонента вузла (табл. 1) визначалася відповідно до вказівок, наведених у [10]. Також докладні рекомендації по використанню компонентного методу наведені в роботах [3, 7, 13].

Результати етапів 1 та 2 наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Несуча здатність активних компонентів вузла

| Активний компонент вузла | Несуча здатність компонента | |
|---|---|---|
| **Стінка колони при зсуві** | 907.6 кН | |
| **Стінка колони при стисканні** | 750.3 кН | |
| **Стінка колони при розтягуванні:**<br>Ряд болтів 1<br>Ряд болтів 2<br>Ряди болтів 1 і 2 в групі | <br>760.7 кН<br>760.7 кН<br>893.8 кН | |
| **Полиця колони при згинанні**<br>Вичерпання несучої здатності компонента відбувається в результаті трьох типів відмови:<br>Тип 1. Повний розвиток пластичних деформацій в полиці.<br>Тип 2. Розрив болта з розвитком пластичних деформацій в полиці.<br>Тип 3. Розрив болта. |  <br>Тип відмови 1 |  <br>Тип відмови 2 |

| | |
|---|---|
| Несуча здатність компонента однакова для болтів ряду 1 і 2, які розглядаються окремо |  <br>Тип відмови 3 |
| Тип 1<br>Тип 2<br>Тип 3 | 934.74 кН<br>560 кН<br>508.4 кН |
| Несуча здатність компонента для ряду болтів 1 і 2 при врахуванні групової роботи | |
| Тип 1<br>Тип 2<br>Тип 3 | 1568 кН<br>913 кН<br>1016.64 кН |
| **Опорний фланець при згинанні**<br>Вичерпання несучої здатності відбувається в результаті тих же видів відмови, як і для компонента «полиця колони при згинанні» | |
| **Ряд болтів 1** | |
| Тип 1<br>Тип 2<br>Тип 3 | 690.8 кН<br>510 кН<br>508.32 кН |
| **Ряд болтів 2** | |
| Тип 1<br>Тип 2<br>Тип 3 | 690.8 кН<br>477.4 кН<br>508.32 кН |
| **Ряд 1 і 2 при врахуванні групової роботи** | |
| Тип 1<br>Тип 2<br>Тип 3 | 803.5 кН<br>510 кН<br>1016.64 кН |
| **Полиця та стінка балки при стисканні** | 743 кН |
| **Стінка балки при розтягуванні** | |
| Ряд болтів 1<br>Ряд болтів 2<br>Ряди болтів 1 і 2 в групі | 607.2 кН<br>520.3 кН<br>739.2 кН |

**Етап 3**: визначення несучої здатності вузла.

Збірка:

а) несуча здатність ряду 1 окремо:

- стінка колони при розтягуванні 760.7 кН;
- поличка колони при згинанні 508.32 кН;
- опорний фланець при згинанні 508.32 кН;
- стінка балки при розтягуванні 607.2 кН;
- мінімальне значення $F_{1,min}$ = 508.32 кН.

б) несуча здатність ряду 2 окремо:

- стінка колони при розтягуванні 893.8 кН;
- поличка колони при згинанні 508.4 кН;
- опорний фланець при згинанні 477,4 кН;
- стінка балки при розтягуванні 739.2 кН;
- мінімальне значення $F_{2,min}$ = 477.4 кН.

Сумарна величина максимального зусилля, яка може бути сприйнята болтами ряду 1 і 2 без врахування їх роботи в групі складає:

$$F1,min + F2,min = 508.4+477.4 = 985.8 \text{ кН.} \quad (1)$$

Отримане значення порівнюється з величиною максимального зусилля, яке може бути передано болтами рядів 1 і 2 при врахуванні їх групової роботи.

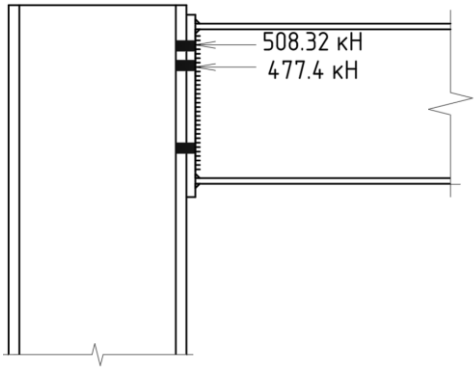



Рис. 3. Максимальні зусилля, які можуть бути сприйняті рядами 1 і 2 без врахування їх роботи в групі

Несуча здатність болтів ряду 1 і 2 з урахуванням їх групової роботи:

- поличка колони при згинанні 913 кН;
- стінка колони при розтягуванні 893.8 кН;
- стінка балки при розтягуванні 739.2 кН;
- $F_{1+2,min}$= 739.2 кН.

Несуча здатність болтів ряду 1 і 2 при врахуванні групової роботи, менше несучої здатності болтів ряду 1 і 2 без урахування групової роботи, тому у відповідності до [12] необхідно провести коригування значення зусилля для ряду 2 (рис. 4).

$$F_{2,min,red} = F_{1+2,min} - F_1 = 739.2 - 508.32 = 230.88 \text{ кН}. \quad (2)$$

Вичерпання несучої здатності інших активних компонентів вузла настає при наступних значеннях внутрішніх зусиль:

- стінка колони при зсуві 907.6 кН;
- стінка колони при стисненні 750.3 кН;
- стінка балки та пояс при стисненні 743 кН;
- $F_{global,min}$ = 743 кН.

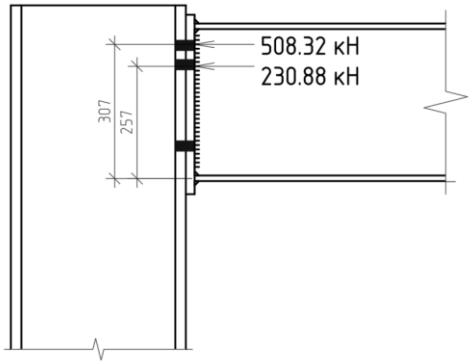



Рис. 4. Максимальні зусилля, які можуть бути сприйняті рядами 1 і 2 після корегування

Аналізуючи отримані величини граничних зусиль, можна сказати, що з умови рівноваги несуча здатність компонента «стінка балки і пояс при стисненні» обмежуватиме максимальне зусилля, яке може бути передано через ряди болтів вузла. Оскільки в нашому випадку

$$(F_{1,min} + F_{2,min}) < F_{global,min}, \quad (3)$$

то подальше корегування зусиль, що передаються через ряди болтів 1 і 2, не потрібно.

Величина згинального моменту, який може сприйняти вузол, становить:

$$M_{j,Rd} = 508.32 \cdot 0.307 + 230.88 \cdot 0.257 = 215.4 \text{ кНм}. \quad (4)$$

Розрахунок вузлового з'єднання, що розглядався, також був проведений з використанням програмного комплексу IDEASTATICA (https://www.ideastatica.com/free-trial), в основу якого положено кінцево-елементний метод [14]. Результати розрахунку наведені на рис. 5.

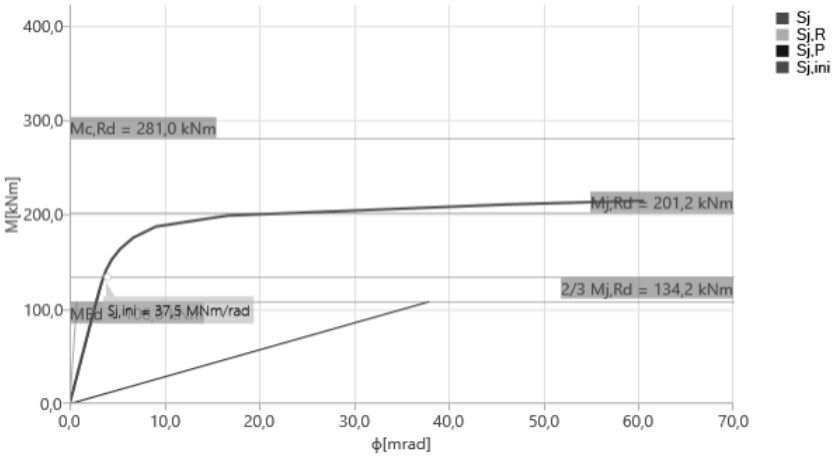



Рис. 5. Характеристики вузла по жорсткості та міцності, отримані на підставі кінцево-елементного компонентного методу ($M_{j,Rd}$ - Bending resistance - розрахункова несуча здатність вузла при згині; $S_{j,ini}$ -

Initial rotational stiffness - початкова обертальна жорсткість вузла; $S_{j,s}$ - Secant rotational stiffness - січна обертальна жорсткість вузла; Ф - Rotational deformation - кут повороту вузла; Фс - Rotational capacity - розрахункова несуча здатність вузла при куті повороту; $S_{j,R}$ - Limit value - rigid joint - граничне значення початкової обертальної жорсткості для жорсткого вузла; $S_{j,p}$ - Limit value - nominally pinned joint - граничне значення початкової обертальної жорсткості для номінально шарнірного вузла; $M_c$ - значення внутрішнього моменту в колоні на рівні вузла; $M_{Ed}$ - розрахункове значення внутрішнього моменту).

## Висновки

Розрахунок несучої здатності вузлових з'єднань в аналітичній формі за вказівками норм ЕС3 вимагає від проектувальника значних витрат часу. Використання спеціалізованого програмного забезпечення значно полегшує завдання оцінки характеристик міцності і жорсткості вузла з його подальшою класифікацією.

### Література


*1. Boracchini, A. Design and analysis of connections in steel structures / Alfredo Boracchini - Ernst&Sohn, 2018.*

*2. Trahair, N.S. The behavior and design steel structures to EC3 / N.S. Trahair, M.A. Bradford, D.A. Nethercot, L. Gardner - Taylor &Francis London and New York, 2008. – 513 p.*

*3. Joints in steel construction. Moment - resisting joints to Eurocode 3 / The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association, 2013. – 172 p.*

*4. Bernuzzi, C. Structural steel design to Eurocode 3 and AISC Specifications / C. Bernuzzi, B. Cordova - John Wiley & Sons, 2016.*

*5. Kozlovski, A. Estimation of the initial stiffness and moment resistance on steel and composite joints / A. Kozlovski, R. Kowalczyk, M. Gizejowski - CTUBH 8-th World congress, 2008. – p 1–7.*

*6. Graham, W. Structural Steelwork Connections / Graham W Owens & Brian D Cheal - Butterworth-Heinemann, 1989. – 336 p.*

*7. Joints in Steel Construction. Moment connections / The Steel Construction Institute. 239 p.*

*8. Jaspart, J.P. Design of joints in steel and composite structures / J.P. Jaspart, K. Weynand - Ernst&Sohn, 2018.*

*9. Ana M.Girao Coelho. Finite – element modeling of the nonlinear behavior of bolted T-stub connections / 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).*

*10. Eurocode 3. EN1993-1-8. Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints / CEN, Brussels, 2005.*

*11. Steenhuis, M. Application of the component method to steel joints / M. Steenhuis, J.Jaspart, F. Gomes, T.Leino – Enginering, 1998.*

*12. 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.*

*13. Moore, D.B. Design of structural connections to Eurocode 3 frequently asked questions [Текст] / Moore D.B., Wald F. - Building Research Establishment Ltd, 2003 Watford.*

*14. Lubomír Šabatka1. Structural Analysis and Design of Steel Connections Using Component-Based Finite Element Model / Lubomír Šabatka1, František Wald2, Jaromír Kabeláč 3, Drahoslav Kolaja1 and Martin Pospíšil1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: DOI: 10.17265/1934-7359/2015.08.002.*


### References


1. Alfredo Boracchini (2018). Design and analysis of connections in steel structures. *Ernst&Sohn*.

2. N.S. Trahair, M.A. Bradford, D.A. Nethercot, L. Gardner (2008). The behavior and design steel structures to EC 3. *Taylor &Francis London and New York*, 513 p.

3. Joints in steel construction (2013). Moment - resisting joints to Eurocode 3. *The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association*), 172 p.

4. C. Bernuzzi, B. Cordova (2016). Structural steel design to Eurocode 3 and AISC Specifications. *John Wiley & Sons*.

5. A. Kozlovski, R. Kowalczyk, M. Gizejowski (2008). Estimation of the initial stiffness and moment resistance on steel and composite joints. *CTUBH 8-th World congress* p.1–7.

6. Graham W Owens & Brian D Cheal (1989). Structural Steelwork Connections. *Butterworth-Heinemann*, 336 p.

7. Joints in Steel Construction. Moment connections. The Steel Construction Institute, 239 p.

8. J.P. Jaspart, K. Weynand (2018). Design of joints in steel and composite structures. *Ernst&Sohn*.

9. 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).

10. Eurocode 3 (2005). EN1993-1-8. Design of steel structures – Part 1–8: Design of joints. *CEN, Brussels*.

11. M. Steenhuis, J.Jaspart, F. Gomes, T.Leino (1998). Application of the component method to steel joints. *Enginering*.

12. 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*.

13. Moore D.B., Wald F. (2003). Design of structural connections to Eurocode 3 frequently asked questions. *Building Research Establishment Ltd, Watford*.

14. Lubomír Šabatka1, František Wald2, Jaromír Kabeláč 3, Drahoslav Kolaja1 and Martin Pospíšil1. Structural Analysis and Design of Steel Connections Using Component-Based Finite Element Model. DOI: 10.17265/1934-7359/2015.08.002.


**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Яровий С.М., Харківський національний університет будівництва та архітектури, Україна.

**Автор:** СОЛОДОВНИК Юлія Юріївна
*асистент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій*
*Харківський національний університет будівництва та архітектури*
*E-mail – solladesign@gmail.com*
*ID ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5243-9993*

**Автор:** РЮМІН Володимир Володимирович
*кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій*
*Харківський національний університет будівництва та архітектури*
*E-mail – luger09par@yahoo.com*
*ID ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8884-589X*

**Автор:** НІКІЧАНОВ В'ячеслав Володимирович
*кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій*
*Харківський національний університет будівництва та архітектури*
*E-mail – v_valx7@bigmir.net*
*ID ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5913-104*

## EVALUATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF THE STEEL CONSTRUCTION JOINTS ON THE BASIS OF COMPONENT METHOD

Y. Solodovnyk, V. Riumin, V. Nikichanov
Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine

*Connections are essential in every kind of steel constructions. Structure is a constructed assembly of joints separated by members which implies the importance of connections. Three basic parameters describe the behavior of connections: strength, stiffness and ductility, and the mechanical behavior of steel joint in those terms are complex phenomena. It must be said that absence in current Ukrainian design codes rules for the load capacity calculation of steel constructions connections led to some difficulties in project decisions. On the basis of component method, which lay in the EC3 design codes load capacity estimation of beam to column connection was made. According to component method beam to column connection divided into basic components. EN 1993 -1-8 provides a good overview of different components. Most important components for bolted steel joints are the plates and bolts which both are considered by the design of a T-stub through the "Equivalent T-stub in tension". The procedure of load capacity calculation used yield line formulations to determine resistance of the following basic components: column flange in bending, end plate in bending, column flange in bending, column web in tension, column web in compression, beam flange in compression. Failure by this method is described by yield-line models depending on geometry of plates and bolts. Obtained analytical results were compared with the results obtained by means of specialized software and it shown their adequacy. It must be noted that presented in EC3 calculation algorithm of beam to column connection is time consumable for domestic designer also designer must have knowledge about features of connection design in countries of EC. The choice of design procedure depends on the time effort and thereby to the designer preferences.*

***Keywords:*** *steel constructions, component method, load capacity.*