

Застосування компонентного методу розрахунку металевих вузлів в сучасній практиці

Олег Романишен, аспірант¹ (ORCID: 0009-0001-0925-8329)

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

АНОТАЦІЯ

На основі компонентного методу виконано розрахунок вузла та проаналізовано трудомісткість такого методу. Дано початок дослідженням топологій вузлів що не враховані в існуючих нормативах. Проаналізовано останні дослідження в частині розрахунків вузлів які розширюють можливості застосування компонентного методу. Зроблено висновки стосовно подальшого розвитку аналітичних методів розрахунку вузлів.

Ключові слова: компонентний метод, металеві вузли, жорсткість, міцність.

1. ВСТУП

Будь-яка нормативна база має обмеження стосовно надання рішень для тих чи інших практичних задач. Це обумовлено множинністю варіантів конструювання вузлів та постійним запитом на удосконалення вже існуючих підходів і методик. Так в Єврокоді 3 [1] приведено формульні залежності коефіцієнтів жорсткості для основних компонентів вузлів, проте вони не враховують усіх можливих конфігурацій з'єднань.

Робота містить огляд розрахунку вузла компонентним методом, а також висновки та узагальнення стосовно актуальності застосування такого методу.

2. МЕТА

Аналітичний розрахунок допоможе зрозуміти трудомісткість що опосередковано вкаже на подальший розвиток даної технології. Наявна нормативна база покаже можливості та прогалини, на заповненні яких має бути зосереджена увага.

3. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ФЛАНЦЕВОГО ВУЗЛА КОМПОНЕНТНИМ МЕТОДОМ

Компонентний метод дозволяє інженерам аналізувати складні з'єднання (болтові, зварні) шляхом розкладання їх на компоненти. Кожен компонент аналізується окремо, а потім їхні характеристики об'єднуються для визначення загальної міцності, жорсткості та інших властивостей з'єднання. Це забезпечує системний, безпечний і логічний підхід до розрахунку.

В якості з'єднання обрано фланцевий вузол приєднання балки 533x210x92 UKB до колони 254x254x107 UKC. Розтягнута полиця балки кріпиться за допомогою 3-х рядів болтів M24 класу 8.8, стиснута за допомогою 1-го ряду аналогічних болтів. Зварні з'єднання поєднують балку і фланець.

Консервативно прийнято, що центром повороту вузла є середина лінії стиснутого поясу балки. Тоді ряд болтів який знаходиться найдалше від стиснутої зони бути сприймати найбільші зусилля розтягу, а зсув буде сприйматись болтами що знаходяться в стиснутій нижній зоні. В розтягнутій зоні враховується три базових сценарії: повний розвиток пластичних деформацій у полиці, розрив

болта з розвитком пластичних деформацій у полиці, розрив болта. Розраховано ефективний опір розтягу як кожного болтового ряду окремо, так і їхній комбінації (1 з 2, 1 з 2 та 3, 2 з 3). Для кожного з випадків враховувався опір болтів, фланця, полиці колони, стінки балки, стінки колони. Під час цього етапу розрахунку для кожного окремого випадку обирається своя ефективна довжина еквівалентних Т-подібних елементів. Такі Т-подібні елементи використовуються для моделювання несучої здатності полиці колони що згинається та фланця колони що згинається. Окремо розраховується опір стиснутої зони яка впливає на стінку колони та полицю балки. Стінки колони чинять опір зсуву.

Отримано 18 результуючих опорів компонент на розтяг серед яких вибрані мінімальні. Ключовою умовою є забезпечення рівноваги та/або забезпечення граничних опорів стінки колони на зсув. Момент опору визначено як суму добутоків зусилля в болтах на відповідне плече сили що визначається від центру стиску. Він склав 409.11 кН·м.

Зсув сприймається болтами які стиснуті а також враховується 28% розтягнутих болтів. Встановлення ребер жорсткості для даної конфігурації вузла не вимагається. Перевіряється міцність призначених зварних швів. При цьому вона має вплив на попередні кроки розрахунку. Тому якщо міцність зварних швів виявляється незадовільною – вони мають бути збільшені і відповідним чином перераховані попередні кроки.

Жорсткість вузла також складається з жорсткості компонентів. Визначаються вони як для окремих рядів болтів так і для компонентів що напряму не залежать від болтів. Присвоєння жорсткісних компонентів відбувається відповідно до вимог [1]. В даній топології вузла компоненти призначаються в кількості 4шт на кожен новий ряд розтягнутих болтів. Ефективні коефіцієнти жорсткості k_{eff} стають одним еквівалентним коефіцієнтом жорсткості k_{eq} що характеризує податливість компонентів що прикріплюються двома або більше рядами розтягнутих болтів. Поворотна жорсткість визначається за формулою:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \cdot \sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (1)$$

На основі класифікаційних границь вузол віднесено до напівжорстких.

4. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОНЕНТНОГО МЕТОДУ В МІЖНАРОДНІЙ ПРАКТИЦІ

Оцінити трудомісткість розрахунку вузлів компонентним методом згідно з EN 1993-1-8 можна як досить високу, особливо для складних з'єднань, які вимагають перевірки в кількох площинах. Він вимагає аналізу кожного окремого компонента (болта, торцевої пластини, стінки колони) за окремими формулами, а потім — їхньої комбінації. Для кожного компонента потрібно розрахувати його жорсткість і несучу здатність, а також перевірити його пластичність. Це не швидкий і не простий процес, він вимагає глибоких знань та значних часових витрат. Часто розрахунок є ітеративним. Наприклад, якщо компонент виявляється ослабким, інженер повинен змінити його параметри і повторити весь розрахунок, що забиратиме додатковий час.

Важливим є те, що не всі конфігурації вузлів можуть бути обчислені за формулами які закладені в Єврокодах. Ряд досліджень виконано для висвітлення нових коефіцієнтів жорсткості компонентів вузлів. В роботі [2] досліджено вплив додаткових пластин (які приварені між полицями колони з метою приєднання другорядних балок по слабкій осі) на коефіцієнт жорсткості стінки колони під дією зсуву за рахунок додаткової жорсткості що привнесена в вузол цими пластинами. При подібних конструюваннях вузлів досліджено й інші жорсткості компонентів вузла які піддаються впливу згину, розтягу, стиску, зсуву [3-4].

При формуванні рамно-в'язевих конструктивних схем в поздовжньому напрямку приймаються припущення стосовно моделювання вузлів аналогічні тим як і для основним рам. Проте такі з'єднання можуть мати малу жорсткість, особливо коли фасонка кріпиться до елементів колон/балок що виконанні з замкнутих профілів. Саме такі перерізи набули широкого поширення в країнах Азії і активно починають використовуватись в Україні беручи за основу підходи висвітленні в публікаціях Міжнародного комітету з розвитку та дослідження трубних конструкцій (CIDECT). В Єврокод 3 [1] та в CIDECT не приведено визначення жорсткості для всіх варіантів вузлів, що формує необхідність в подальших аналітичних дослідженнях. Певні дослідження виконанні зокрема Ali Ajwad та інші [5], які оцінили початкову жорсткість Т-подібного приєднання фасонки до круглої труби у випадку коли фасонка прорізає і врізається в переріз основного елемента на всю товщину.

Проектування металевих рам не обмежується застосування профілів відкритого типу (прокатні двотаври). В роботі Ismael Garcia та інші [6] досліджено з'єднання балок з колонами що виконанні з профільних труб. Кріплення відбувалось через кутики двох типорозмірів які через приварні «stud» болти кріпились до колони і через звичайні болти до поясів балок. Не зважаючи на те що було запропоноване спрощене аналітичне рівняння для оцінки жорсткості вузлів воно може бути застосоване лише для з'єднань, де натяг створює лише один ряд із «stud» болтів. Їхня кількість є недостатньою для узагальнення результатів на широкий спектр конфігурацій з'єднань. Очевидно, що під час дії підвищених навантажень вирішення вузлів приєднання балок до колон з профільних труб буде значно іншим (необхідна значно більша к-сть 'stud'-болтів).

Навіть найменші складові вузла мають свій вплив на його жорсткість, оскільки є окремими компонентами. В роботі [7] досліджено вплив кутових швів на початкову обертальну жорсткість зварних вузлів із труб. Автори

наголошують на відсутності аналітичних методик визначення жорсткості при кутах з'єднання, відмінних від 90°, що ускладнює оптимізацію конструкцій.

5. ВИСНОВКИ

Наявна нормативна база, зокрема Єврокод 3, є ефективним інструментом, але має обмеження щодо її універсальності. Компонентний метод, попри свою логічність і системність, є надзвичайно трудомістким при ручних розрахунках. Він вимагає детального аналізу великої кількості компонентів та включає ітеративний процес. Дослідження, представлені в даній роботі, підкреслюють, що існуючі формули недостатні для оцінки поведінки з'єднань, які набувають поширення. Це вказує на нагальну потребу в подальших аналітичних та експериментальних дослідженнях для розробки нових коефіцієнтів жорсткості та розрахункових методик.

Список літератури

- [1] ДСТУ-Н Б EN 1993-1-8:2011 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-8: Проектування з'єднань (EN 1993-1-8:2005, IDT). - [Чинні від 2013-07-01]. – К: Мінрегіонбуд України, 2010. – 188с.
- [2] Manuel Lopez, Alfonso Loureiro, Ruth Gutierrez, Jose M. Reinos. A novel analytical formulation for the stiffness of the component column web panel in shear with additional plates in bolted steel joints. 2024. Volume 306. 117856. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117856> (дата звернення 25.05.2025).
- [3] Ricardo Costa, José Valdez, Sara Oliveira, Luís Simões da Silva, Eduardo Bayo. Experimental behaviour of 3D end-plate beam-to-column bolted steel joints. 2019. Vol. 2, P. 277-289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.017> (дата звернення 25.05.2025).
- [4] A. Loureiro, M. López, R. Gutiérrez, J.M. Reinos. Experimental and numerical analysis of E-stubs in three dimensional joints: A new analytical formulation for the stiffness calculation. 2013. Vol.53, P.1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.035> (дата звернення 25.05.2025).
- [5] Ali Ajwad, Sabatino Di Benedetto, Massimo Latour, Gianvittorio Rizzano. Stiffness of welded T-joints with CHS chord members and passing-through longitudinal plates. Vol. 71, 107963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107963> (дата звернення 17.08.2025).
- [6] Ismael Garcia, Miguel A. Serrano, Carlos Lopez-Colina, Fernando L. Gayarre. The stiffness of beam-to-RHS joints with welded studs. Volume 70, 106340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2023.106340> (дата звернення 30.08.2025).
- [7] Garifullin M., Bronzova M., Jokinen T., Heinisuo M., Kovacic B. Effect of fillet welds on initial rotational stiffness of welded tubular joints. Procedia Engineering. 2016. Vol. 165. P. 1643–1650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.905> (дата звернення 31.08.2025).