

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.042.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/46>

Чичуліна К.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Щур-Дунець О.І.¹

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Щур-Дунець О.І.²

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ЖОРСТКИХ ВУЗЛІВ РАМНИХ КАРКАСІВ

Розглянуто розрахунок надійності жорсткого вузла сталевого рамного каркасу будівлі. Проводиться врахування деяких параметрів дійсної роботи фланцевого з'єднання ригеля з колоною. Аналізується жорстке з'єднання ригеля з колоною для рамно-в'язевих каркасів одноповерхових та багатопверхових будівель з з'єднання за допомогою фланця на болтах підвищеної міцності класу 6,6–10,9. У такому вузлі болти працюють на розтяг, фланець працює на згин, а поперечну силу від балки приймає на себе столик, приварений до колони, чи болти самого фланцю, які частіше по розрахунках працюють в запас на зрізання. Болти проектується на максимальне зусилля розтягу і приймаються (частіше) одного типорозміру, тому в з'єднанні існує деякий резерв несучої здатності, котрий необхідно враховувати при розгляді реальної роботи вузла. Пропонується використання умовно-жорстких рамних вузлів. Надійність вузла визначається з умов взаємопов'язаної роботи окремих елементів. Пропонуються розрахункові коефіцієнти для проектування даного типу вузлів. В ході розрахунку були порівняні невеликі коефіцієнти кореляції $r_{ij} < 0,5$, тобто відмови елементів можна вважати незалежними. При незалежності випадкових характеристик для елементів вузла ймовірність відмови вузла в цілому буде наближено розраховуватись як сума всіх ймовірностей відмови елементів, запроєктованих згідно з нормами, вона буде дещо вища, ніж ймовірність відмови одного елемента. Для врахування цього фактору випадковості відмови пропонується використовувати коефіцієнт зниження розрахункового опору γ_z , який залежить від кількості незалежних елементів вузла n , представлений графіком. Для інженерної практики в статті пропонується використання коефіцієнта $\gamma_z = 0,9$. В європейських нормах проектування представлено розрахунок подібного вузла, близький до розгляду роботи елементів вузла у вигляді логічного з'єднання елементів. Загалом в статті проаналізовані міжнародні норми та стандарти.

Ключові слова: відмова, надійність, жорсткі вузли, рамні каркаси.

Постановка проблеми. Сучасне будівництво потребує виключення із практики проектування вузлів на монтажному зварюванні у зв'язку із значною їх трудомісткістю. Тому до використання як вітчизняними, так і європейськими нормами останній час рекомендуються до застосування фланцеві вузли на болтах підвищеної міцності. Такі з'єднання надають можливість скоротити час монтажу конструкцій. Впровадження нових з'єднань вимагає більш повного з'ясування їх дійсної роботи. Необхідність зменшення ваги

конструкцій потребує більш повного визначення взаємозв'язків між несучою здатністю елементів вузла. Для визначення міри статистичної залежності між цими величинами можна використовувати коефіцієнт кореляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В європейських нормах проектування [1] представлено розрахунок подібного вузла, близький до розгляду роботи елементів вузла у вигляді логічного з'єднання елементів. Загалом в статті проаналізовані міжнародні норми та стандарти [1–6]. Дана стаття опирається на українські норми вказані в [7–8]. У [9–10] представлені основні

¹ Щур-Дунець Олександра Ігорівна

² Щур-Дунець Омелян Ігорівна

поняття теорії надійності, компоненти та показники надійності, найбільш поширені методи оцінювання показників надійності будівельних конструкцій, імовірнісні моделі навантажень, методи їх статистичного дослідження та встановлення розрахункових значень. Базуючись на викладках [10], розраховано кореляційний момент даного вузла.

Метою статті є пошук розрахункового алгоритму надійності жорсткого вузла сталевих рамного каркасу будівлі з урахуванням деяких параметрів дійсної роботи фланцевого з'єднання ригеля з колоною на основі міжнародних норм та стандартів.

Виклад основного матеріалу. Основним жорстким з'єднанням ригеля з колоною для рамно-в'язевих каркасів одноповерхових та багатопверхових будівель є з'єднання за допомогою фланця на болтах підвищеної міцності класу 6,6–10,9 (рис. 1).

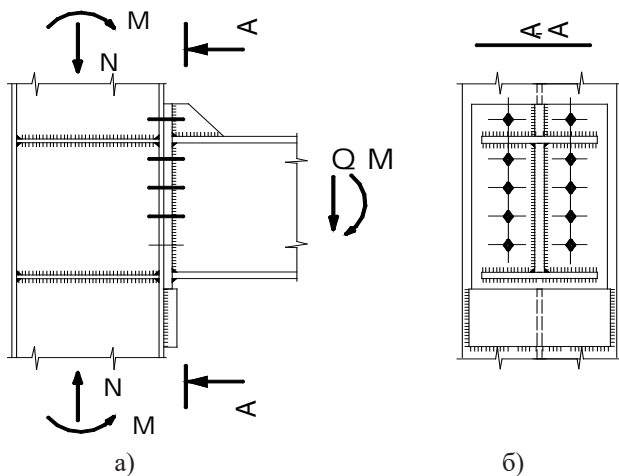


Рис. 1. Типовий вузол жорсткого спряження балки з колоною

У такому вузлі болти працюють на розтяг, фланець працює на згин, а поперечну силу від балки приймає на себе столик, приварений до колони, чи болти самого фланцю, які частіше по розрахунках працюють в запас на зрізання. Болти проєктуються на максимальне зусилля розтягу і приймаються (частіше) одного типорозміру, тому в з'єднанні існує деякий резерв несучої здатності, котрий необхідно враховувати при розгляді реальної роботи вузла.

При розрахунках вузла розглядаються різні стани відмови, у яких може знаходитись з'єднання. Представлений у європейських нормах проєктування [1] розрахунок подібного вузла близький до розгляду роботи елементів вузла у вигляді логічного з'єднання елементів.

При розгляді роботи елементів вузла можна відмітити, що Пластичні деформації вузла перед-

бачають деформації болтів і деформації від згину фланця в площині дії болтів. Поряд з основними зусиллями в стінці балки F_w , від дії моменту в балці і зусилля розтягу у болті F_a , необхідно враховувати дію моменту у консольній частині фланцю M_k . Реакція цього моменту додає зусилля, що розтягує, у болті за рахунок плеча «а» (рис. 2, б). Різниця зусилля розтягу у болті:

$$\Delta F_a = R_y W_k (a + b) / ab, \quad (1)$$

де R_y – розрахунковий опір сталі фланця; W_k – момент опору консолі на ділянці роботи болта.

На відміну від сталевих, в залізобетонних конструкціях жорсткість ригеля і колони регулюється арматурою. До визначеного розрахунком моменту M_{cp} вузол працює як звичайне жорстке з'єднання, при зростанні навантаження і досягнувши граничного моменту далі вузол працює як умовно шарнірний. Пропонується використання для сталевих рам умовно жорстких податливих вузлів, які забезпечують перерозподіл зусиль (момент згину) між навантаженими ригелями та колонами. Якщо обмежити значення моменту, котрий передається на колону від балки за рахунок регулювання жорсткості вузла, можливо отримувати значну економію сталі при проєктуванні колон одноповерхових та багатопверхових будівель. Податливість вузла можливо забезпечити за рахунок пружно пластичної роботи болтів у фланцевому з'єднанні, або використанням розрахованих пружин, що не стиснуті, на болтах фланцевого з'єднання чи встановленням пружних прокладок в замкненому сталевому корпусі. Усі ці демпферні пристрої повинні попередньо розраховуватись на стиск враховуючи границю жорсткості вузла Демпферні пристрої мають виконувати роль вирівнювача зусиль в рядах болтів у фланцевому з'єднанні.

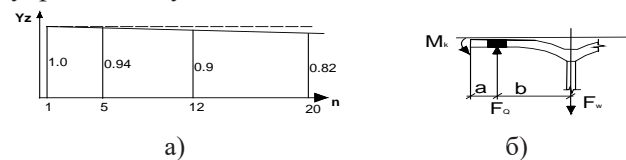


Рис. 2. До оцінювання надійності вузлів: а) графік залежності коефіцієнта зниження розрахункового опору γ_z від кількості статично незалежних елементів n вузла; б) схема роботи фланця балки

При розрахунках на надійність умову безвідмовної роботи рамного вузла можна представити як:

$$\tilde{x}_i = \tilde{\sigma}_{mi} - \tilde{\sigma}_{qi} \geq 0, \quad (2)$$

де $\tilde{\sigma}_{mi}$ – випадковий параметр міцності i -го елемента вузла;

$\tilde{\sigma}_{q_i}$ – випадковий параметр навантаження і-го елемента вузла.

Для вузлів, структурні схеми яких можна представити у вигляді послідовного з'єднання незалежних елементів, умови безвідмовної роботи мають вигляд:

$$Y(x_1, x_2 \dots x_n) = \prod_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

Запишемо вираз для резерву несучої здатності двох елементів одного і того ж вузла:

$$\tilde{Y}_1 = \tilde{X} - a_1 \tilde{q}, \quad (4)$$

$$\tilde{Y}_2 = \tilde{Z} - a_2 \tilde{q}, \quad (5)$$

де \tilde{X}, \tilde{Z} – випадкова характеристика міцності елемента (межа плинності сталі для основних деталей, межа плинності металу зварних швів і болтів), для загальності вважаємо їх різними для різних деталей;

\tilde{q} – навантаження на конструкцію в цілому, наприклад, снігове навантаження на покриття, яка створює в елементах вузлів напруження $a_1 \tilde{q}, a_2 \tilde{q}$ (робота конструкції вважається лінійною).

Розпишемо кореляційний момент для функцій (4) і (5), базуючись на викладах [10]:

$$\begin{aligned} K_{Y_1 Y_2} &= M[(Y_1 - \bar{Y}_1)(Y_2 - \bar{Y}_2)] = M[(X - a_1 q - \bar{X} + a_1 \bar{q})(Z - a_2 q - \bar{Z} + a_2 \bar{q})] = \\ &= M\{[(X - \bar{X}) - a_1(q - \bar{q})][(Z - \bar{Z}) - a_2(q - \bar{q})]\} = \\ &= M\{[(X - \bar{X})(Z - \bar{Z}) - a_1(q - \bar{q})(Z - \bar{Z}) - a_2(q - \bar{q})(X - \bar{X}) + a_1 a_2 (q - \bar{q})^2]\} = \\ &= M\{[(X - \bar{X})(Z - \bar{Z})] - M[a_1(q - \bar{q})(Z - \bar{Z})] - M[a_2(q - \bar{q})(X - \bar{X})] + M[a_1 a_2 (q - \bar{q})^2]\} = \\ &= K_{XZ} - a_1 K_{qZ} - a_2 K_{qX} + a_1 a_2 \tilde{q}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Стандарти лінійних функцій (4) і (5) записуються у вигляді:

$$\tilde{Y}_1 = \sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2}; \quad \tilde{Y}_2 = \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}, \quad (7)$$

З урахуванням отриманих виразів запишемо формулу коефіцієнта кореляції для даного випадку у загальному вигляді

$$r_{Y_1 Y_2} = \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{K_{XZ} - a_1 K_{qZ} - a_2 K_{qX} + a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}}. \quad (8)$$

Проведемо узагальнення формули коефіцієнта кореляції.

Для всіх можливих випадків, в зв'язку із незалежністю і міцністю елементів вузлів, відповідні кореляційні моменти (другий і третій члени чисельника формули (8)) перетворюються у нуль. Далі розглянемо усі можливі випадки.

Випадок 1. Обидві деталі виготовляються із одного матеріалу, у зв'язку з чим $X=Z$ і кореляційний момент K_{XZ} , що залишився у чисельнику, перетворюється на дисперсію, а формула (8) приймає наступний вигляд :

$$r_{Y_1 Y_2} = \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{\tilde{X}^2 + a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}}. \quad (9)$$

Випадок 2. Деталі виготовляються із різних матеріалів, внаслідок чого випадкові величини X і Z стають незалежними, кореляційний момент K_{XZ} перетворюється на нуль, а формула (8) записується як:

$$r_{Y_1 Y_2} = \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}}. \quad (10)$$

Зв'яжемо стандарти міцності і напруження від загального навантаження співвідношеннями:

$$a_1 \tilde{q} = p_1 \tilde{X}, a_2 \tilde{q} = p_2 \tilde{Z}. \quad (11),$$

При цьому в практичних розрахунках стандарт міцності значно перевищує стандарт напруження від зовнішнього навантаження, тому звичайно $p_1 < 1, p_2 < 1$.

З урахуванням співвідношень, що були введені, перетворимо формулу (9)

$$\begin{aligned} r_{Y_1 Y_2} &= \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{\tilde{X}^2 + a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}} = \frac{\tilde{X}^2 + p_1 p_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + p_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + p_2^2 \tilde{q}^2}} = \\ &= \frac{\tilde{X}^2 (1 + p_1 p_2)}{\tilde{X} \sqrt{1 + p_1^2} \tilde{X} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{1 + p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{1 + p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2 + p_2^2 + p_1^2 p_2^2}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Аналогічним чином перетворимо формулу (9)

$$\begin{aligned} r_{Y_1 Y_2} &= \frac{K_{Y_1 Y_2}}{\tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2} = \frac{a_1 a_2 \tilde{q}^2}{\sqrt{\tilde{X}^2 + a_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + a_2^2 \tilde{q}^2}} = \frac{p_1 p_2 \tilde{X} \tilde{Z}}{\sqrt{\tilde{X}^2 + p_1^2 \tilde{q}^2} \sqrt{\tilde{Z}^2 + p_2^2 \tilde{q}^2}} = \\ &= \frac{p_1 p_2 \tilde{X} \tilde{Z}}{\tilde{X} \sqrt{1 + p_1^2} \tilde{Z} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2} \sqrt{1 + p_2^2}} = \frac{p_1 p_2}{\sqrt{1 + p_1^2 + p_2^2 + p_1^2 p_2^2}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Отримані формули мають однаковий знаменник і відрізняються на одиницю у чисельнику.

Чисельні значення коефіцієнту кореляції для різних значень p_1 та p_2 надані у графіках на рис. 3.

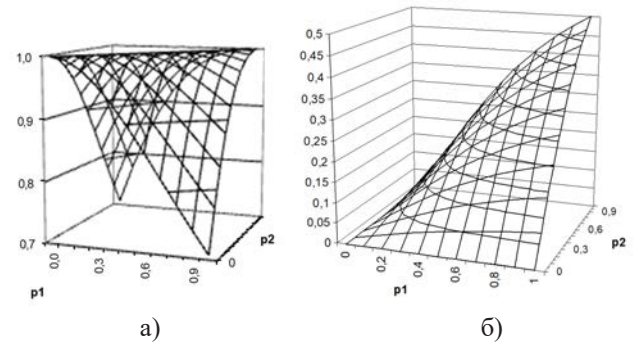


Рис. 3. Чисельні значення коефіцієнту кореляції для різних значень p_1 та p_2 :
а) коефіцієнт кореляції 1-ий варіант;
б) коефіцієнт кореляції 2-ий варіант

Висновки. Якщо отримано порівняно невеликі коефіцієнти кореляції $r_{ij} < 0,5$, відмови елементів можна вважати незалежними. При незалежності випадкових характеристик для елементів вузла ймовірність відмови вузла в цілому буде наближено розраховуватись як сума всіх імовірностей відмови елементів, запроєктованих згідно з нормами, вона буде дещо вища, ніж імовірність відмови одного елемента. Для враху-

вання цього фактору випадковості відмови пропонується використовувати коефіцієнт зниження розрахункового опору γ_z , який залежить від кількості незалежних елементів вузла n , представлений графіком рис. 1, а. Для інженерної практики пропонується використання коефіцієнта $\gamma_z = 0,9$.

Список літератури:

1. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures. Part-1. General Rules and Rules for Buildings. Volume 1. Brussels, 2005. 288 p.
2. ISO 2394:2015. General principles on reliability of structures. International Organization for Standardization. ISO. Geneva, 2015. 73 p.
3. EN 1990. Basis of Structural Design. Eurocode European Committee for Standardization. Brussels, 2005. 89 p.
4. ISO 2394: 2015. General principles on reliability of structures. ISO. Geneva, 2015. 111 p.
6. ISO 13822:2010. Bases for design of structures – Assessment of existing structures. ISO. Geneva, 2010. 50 p.
7. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи. К.: Міністерство розвитку громад та територій України, 2018. 67 с.
8. ДБН В.1.2-6:2022. Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. К.: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 56 с.
9. Пічугін С., Перельмутер А. Деякі особливості розрахунку надійності пошкоджених сталевих конструкцій. *Наука та будівництво*. 2023. Т. 35. № 1. С. 15-26. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-3> (дата звернення: 12.11.2023)
10. Pichugin S. Scientific School «Reliability of Building structures»: new results and perspectives. 36. наук. Праць (галуз. машинобудування, будівництво). 2019. Вип. 2 (53). С. 5–12. URL: <https://doi.org/10.26906/znr.2019.53.1880> (дата звернення: 13.11.2023).

Chichulina K.V., Shchur-Dunets O.I., Shchur-Dunets O.I. STUDY OF RELIABILITY PARAMETERS OF RIGID NODES OF FRAME FRAMES

The calculation of the reliability of the rigid unit of the steel frame of the building is considered. Some parameters of the actual operation of the flange connection of the bolt with the column are taken into account. The analyzed rigid connection of the crossbar with the column for ramen-elm frameworks of one-story and multi-story buildings is the connection using a flange on bolts of increased strength class 6.6–10.9. In such a node, the bolts work in tension, the flange works in bending, and the transverse force from the beam is taken over by the table welded to the column, or the bolts of the flange itself, which are more often calculated to work in reserve for cutting. Bolts are designed for maximum tensile strength and are (more often) of one standard size, so there is some reserve of load-bearing capacity in the connection, which must be taken into account when considering the real operation of the unit. It is suggested to use conditionally rigid frame nodes. The reliability of the node is determined from the conditions of interconnected operation of individual elements. Estimated coefficients for the design of this type of nodes are offered. In the course of the calculation, small correlation coefficients $r_{ij} < 0.5$ were compared, that is, element failures can be considered independent. With the independence of random characteristics for the elements of the node, the probability of failure of the node as a whole will be approximately calculated as the sum of all the failure probabilities of the elements designed according to the standards, it will be slightly higher than the probability of failure of one element. To take into account this factor of randomness of failure, it is proposed to use the coefficient of reduction of the calculated resistance γ_z , which depends on the number of independent elements of the node n , represented by the graph. For engineering practice, the article suggests using the coefficient $\gamma_z = 0.9$. In the European design standards, the calculation of such a node is presented, which is close to considering the operation of the elements of the node in the form of a logical connection of elements. In general, international norms and standards are analyzed in the article.

Key words: failure, reliability, rigid assemblies, frames.