

Аналіз динамічних характеристик конструкцій із болтовими з'єднаннями: експеримент та моделювання

Максим Вабішевич, проф., д-р. техн. наук¹ (ORCID: 0000-0002-0755-5186), Дмитро Савчук, аспірант¹ (ORCID: 0009-0006-0366-0532), Сергій Новіков, аспірант¹ (ORCID: 0009-0004-7502-3255)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті досліджено вплив ступеня затяжки болтових з'єднань на спектрограму власних форм коливань сталевих конструкцій. Автори розробили експериментальну методику, що включає чисельне моделювання в ПК Scad Office та лабораторні випробування реальної конструкції з С-подібних профілів. Встановлено, що варіювання кількості та розташування затягнутих болтів суттєво змінює частотні характеристики, особливо в діапазоні близько 35 Гц. Додатково виявлено, що втрата стійкості другорядної балки призводить не лише до зміни частот, а й до трансформації форм власних коливань. Отримані результати підтверджують доцільність врахування ступеня затяжки болтів при моделюванні та оптимізації конструкцій, а також відкривають перспективи для моніторингу стану з'єднань на основі модального аналізу.

Ключові слова: динамічний моніторинг, болтові з'єднання, частоти коливань, металеві конструкції.

1. ВСТУП

Болтові з'єднання широко використовуються в конструкціях різного призначення, забезпечуючи їхню міцність та стабільність. Однак, окрім статичних характеристик, вони також впливають на динамічні властивості конструкції, зокрема на її спектрограму власних форм коливань. Незважаючи на значну кількість досліджень [1-5] у сфері механічних з'єднань, питання впливу ступеня затяжки болтів на частотні характеристики конструкції залишається недостатньо вивченим. Це особливо актуально для інженерних систем, де точне прогнозування коливань є критично важливим для забезпечення надійності та довговічності конструкцій.

2. МЕТА

Мета даного дослідження - дослідити вплив затягнення болтів у вузловому з'єднанні сталевих тонкостінних елементів на спектрограму власних форм коливань конструкції.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні застосовано комбінований підхід, що поєднує чисельне моделювання в програмному комплексі Scad Office (рис. 1) та лабораторні випробування реальної сталеві конструкції (рис. 2). Модель складалась із С-подібних профілів, з'єднаних болтами через з'єднувальні кутики. Для моделювання болтових з'єднань використано об'єднання поступальних переміщень вузлів в декартовій системі координат, із локальним згущенням сітки скінченних елементів у приболтових зонах. Матеріал конструкції — оцинкована стрічкова сталь S390GD-Z275MA [6], а крок сітки становив 5 мм.

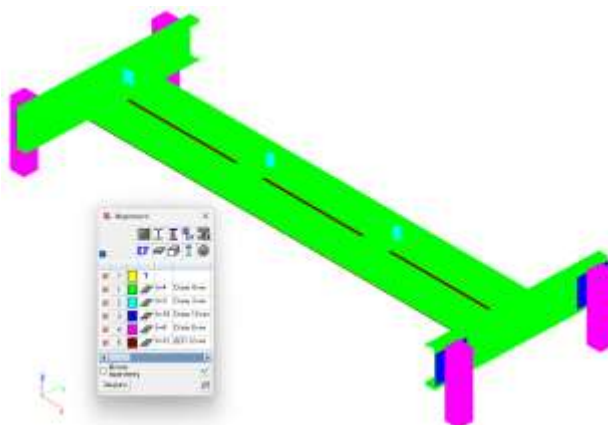


Рисунок. 1. Оболонкова модель конструкції в ПК Scad Office



Рисунок. 2. Реальна конструкція, що досліджувалась в лабораторних умовах.

Лабораторні дослідження проводились на реальній конструкції з аналогічною геометрією, де болти затягувались динамометричним ключем із моментом 95 кНм відповідно до [7]. Випробування включали варіювання кількості та розташування затягнутих болтів у чотирьох вузлах, що дозволило дослідити їхній вплив на спектрограму власних форм коливань. Вимірювання здійснювались в ортогональній декартовій системі координат, а початковим станом конструкції вважалась комбінація з чотирьох затягнутих болтів — по одному в кожному вузлі.

Окремо досліджено вплив втрати стійкості другорядної балки, що виникала при відпусканні та повторному затягуванні болтів, на спектрограму власних форм коливань конструкції. Такі маніпуляції змінювали розрахункову довжину балки, що призводило не лише до зміни частот, а й до трансформації форм власних коливань. Отримані дані порівнювались між експериментальними результатами та чисельним моделюванням, що дозволило підтвердити достовірність методики та її придатність для аналізу динамічної поведінки болтових з'єднань.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДУ

У результаті експериментального та чисельного аналізу встановлено, що частотні характеристики конструкції суттєво змінюються залежно від кількості та розташування затягнутих болтів. Найбільш виражені зміни спостерігались на частоті близько 35 Гц, що відповідає 10-й формі власних коливань. Додавання окремих болтів до базової комбінації призводило до зростання частоти коливань на 2–4%, що підтверджено як лабораторними вимірюваннями, так і розрахунками в Scad Office.

Порівняння спектрограм показало високу чутливість конструкції до локальних змін у болтових з'єднаннях. Найбільші відхилення частот зафіксовано — зростання частоти становило до 4.47% у досліді та до 3.77% у моделюванні. Це свідчить про потенціал використання модального аналізу для діагностики стану з'єднань та прогнозування їхнього впливу на динамічну поведінку конструкції.

Окремо досліджено вплив втрати стійкості другорядної балки, що виникала при маніпуляціях із болтами. Виявлено, що така зміна геометрії призводить не лише до зсуву частот, а й до повної трансформації форм власних коливань. Наприклад, перша форма змінилась на понад 45% у досліді, що підтверджує критичну роль стійкості елементів у формуванні динамічної відповіді конструкції.

5. ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтвердило, що ступінь затяжки болтових з'єднань має суттєвий вплив на частотні характеристики конструкцій. Зміна кількості та розташування затягнутих болтів призводить до варіацій у спектрограмі власних форм коливань, особливо в діапазоні критичних частот. Це дозволяє розглядати болтові з'єднання як активний параметр, що впливає на динамічну поведінку конструкції.

Результати чисельного моделювання в Scad Office узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує достовірність обраної методики. Виявлено, що навіть локальні зміни у конфігурації болтів можуть

спричинити трансформацію форм коливань, а втрата стійкості окремих елементів — до суттєвого зсуву частот. Це підкреслює доцільність виконання ретельного огляду болтових з'єднань при динамічному моніторингу конструкцій.

Отримані результати мають практичне значення для оптимізації механічних систем, підвищення їхньої надійності та розробки методів моніторингу технічного стану болтових з'єднань. Врахування динамічного впливу затяжки болтів дозволяє зменшити ризик резонансних явищ і забезпечити довговічність конструкцій у умовах експлуатаційних навантажень.

Список літератури

- [1] Vabishchevych M.O., Dedov O.P., Savchuk D.O. The current state of the problem of numerical investigation of metal structure refusal based on dynamic monitoring // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. – K.: KNUBA, 2024. – Issue. – P. 52-57. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.52-57>
- [2] Vabishchevych M.O., Dedov O.P., Diachenko O.S., Lytvyn O.V. Research of the design of a T-shaped node of cold-rolled profiles, the connection of which is made by a plate using a bolt connection // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles – K.: KNUBA, 2025. – Issue 114. – P. 62-75. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.62-75>
- [3] Махінько А. В. Практичні підходи до розрахунку надійності багатоболтових з'єднань листів корпусу силосних ємностей / А. В. Махінько, Н. О. Махінько // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини. - 2020. - № 24. - С. 91-97. <https://doi.org/10.31650/2707-3068-2020-24-91-97>
- [4] Toh, G.; Gwon, J.; Park, J. Determination of Clamping Force Using Bolt Vibration Responses during the Tightening Process. Appl. Sci. 2019, 9, 5379. <https://doi.org/10.3390/app9245379>
- [5] Srinath Reddy G, et. al. "Prediction of Bolt Loosening Using Vibrational Analysis and Machine Learning." IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 20(1), 2023, pp. 27-36. <http://doi.org/10.9790/1684-2001012736>
- [6] EN 1991-1-1:2002 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings. 2002.
- [7] DSTU EN 15048-1:2017. Non-preloaded structural bolting assemblies. Part 1: General technical requirements. Kyiv: SE "UkrNDNC", 2017.