

© С.В. Мицюк¹, В.П. Андрієвський¹, Д.В. Мицюк¹, Ю.М. Реп'ях¹

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ НМСЕ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ IDEA STATICA CONNECTION

©S. Mytsiuk¹, V. Andriievskiy¹, D. Mytsiuk¹, Yu. Repyakh¹

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

VERIFICATION OF THE CALCULATION RESULTS OF THE SAFEM BOLTED CONNECTION USING THE IDEA STATICA CONNECTION SOFTWARE

Мета. Полягає в оцінці точності та збіжності різних підходів до розрахунку болтового з'єднання, зокрема методом скінченних елементів (МСЕ), напіваналітичним методом скінченних елементів (НМСЕ), аналітичного розрахунку та програмного комплексу IDEA StatiCa, а також дослідження напруженого стану болтів при урахуванні натягу.

Методика. Дослідження виконано на основі аналізу результатів розрахунків болтових з'єднань, отриманих із застосуванням різних підходів до моделювання натягу болта. Результати розрахунків було отримано за допомогою МСЕ, НМСЕ, програмного комплексу IDEA StatiCa, який застосовує норми EN, аналітичні розрахунки згідно з будівельними нормами ДБН та EN.

Результати. Встановлено незначну різницю у розподілі напружень між методами МСЕ, НМСЕ та результатами, отриманими в IDEA StatiCa. Виявлено розбіжності у напруженому стані болтового з'єднання при врахуванні натягу. Підтверджено збіжність результатів між розрахунками в IDEA StatiCa за нормами EN та моделюванням натягу болта шляхом рівномірного нагріву. Обґрунтовано можливість використання НМСЕ для розрахунку металевих вузлів із болтовими з'єднаннями в порівнянні з методами ДБН, EN, МСЕ та компонентного методу СЕ.

Наукова новизна. В рамках порівняльного аналізу розрахунків болтового з'єднання з використанням різних підходів до моделювання натягу болта, встановлено, що різниця у розподілі напружень між підходами МСЕ та НМСЕ, а також між розрахунками в IDEA StatiCa та іншими методами є незначною. Отримані закономірності підтверджують коректність використання НМСЕ для оцінки напруженого стану болтових з'єднань. Встановлено збіжність результатів, отриманих в IDEA StatiCa за нормами EN, із моделюванням натягу болта шляхом рівномірного нагріву.

Практична значимість. Отримані результати підтверджують можливість використання НМСЕ для аналізу болтових з'єднань у металевих конструкціях, що дозволяє підвищити точність проектування та оцінку їхнього ресурсу. Виявлена збіжність результатів, отриманих у IDEA StatiCa, з числовими методами моделювання сприяє вдосконаленню методик розрахунку, що враховують натяг болтів, контактну взаємодію та пластичні деформації.

Ключові слова: метод скінченних елементів, напіваналітичний метод скінченних елементів, IDEA StatiCa, болтове з'єднання, збіжність.

Вступ. Важливим та досить надійним методом з'єднання конструкцій є болтові та заклепкові з'єднання. Обидва типу з'єднань слугують одній і тій же меті, але є значні відмінності у вигляді та дещо у способі влаштування. Перевагами

болтових з'єднань є висока технологічність, надійність, швидкість монтажних робіт.

Звичайно, було проведено багато досліджень поведінки болтових з'єднань, але досить часто при розрахунку металевих конструкцій елементи вузлів спрощують, проте в деяких моментах такий підхід може привести як до перевитрат матеріалу, так і навпаки. В сучасних умовах виникає необхідність детального аналізу роботи елементів вузлів металевих конструкцій. Це зумовлено досить значними трудовитратами та матеріальними втратами при передчасній заміні елементів вузлів або несвоєчасній відповідно.

Невід'ємною частиною розвитку сучасного проєктування будівельних конструкцій є використання сучасних розрахункових комплексів, тому в якості верифікації отриманих раніше результатів МСЕ при застосуванні ПК Ліра Сапр та НМСЕ [1, 2] будемо використовувати результати розрахунку отриманого в програмному комплексі Idea StatiCa Connection. Даний розрахунковий комплекс використовує компонентний метод скінченних елементів та дозволяє розраховувати вузли складної геометричної форми з малими витратами часу, але має обмеження на детальний аналіз напружено-деформованого стану елементів з'єднання. Основний підхід компонентного методу СЕ полягає в тому, що вузол розглядається як сукупність зв'язаних один з одним елементів-компонентів (рис. 1). Детальніше з підходами даного методу можна ознайомитись в роботі [3].

Суттєвою перевагою НМСЕ є досить проста швидкість задання та швидкість розрахунку просторових елементів. Також НМСЕ досить добре себе зарекомендував як один з найбільш ефективних засобів чисельного моделювання напружено-деформованого стану просторових тіл [4–7].

Метою даного дослідження є порівняльний аналіз раніше отриманих результатів розрахунку вузла з'єднання двох пластин двома болтами М16, що наведені у статтях [1, 2] з результатами отриманими в програмному комплексі Idea StatiCa Connection за нормами EN 1993-1-8 [8].

Основна частина. В статтях [1, 2] були отримані результати розрахунку при моделюванні болтового з'єднання на основі МСЕ, НМСЕ з використанням універсальних чотирикутних СЕ оболонки та просторовими восьмивузловими ізопараметричними СЕ, а також результати аналітичного розрахунку за ДБН В.2.6-198:2014 [9]. Моделювання болтів було реалізовано через об'єднання переміщень в вузлах (підхід №1) та через закріплення переміщень по контуру болта (підхід №2). Моделювання натягу болтів було реалізовано: зосередженими силами, прикладеними по осі болта (підхід №3), навантаженням від рівномірного нагрівання (підхід №4), розподіленими силами, прикладеними по площі поперечного перерізу болта (підхід №5).

Розрахунок на основі МСЕ та НМСЕ [1, 2] виконувався з використанням універсальних просторових восьмивузлових ізопараметричних СЕ, в тому числі для моделювання головки болта та гайки, при цьому модуль пружності СЕ, що потрапляють в зазор між тілом болта та пластинами, прирівнювався до нуля ($E=0$), див. рис. 2. Розрахункову схему, в якій натяг болта моделювався навантаженням від рівномірного нагрівання, наведено на рис. 3.

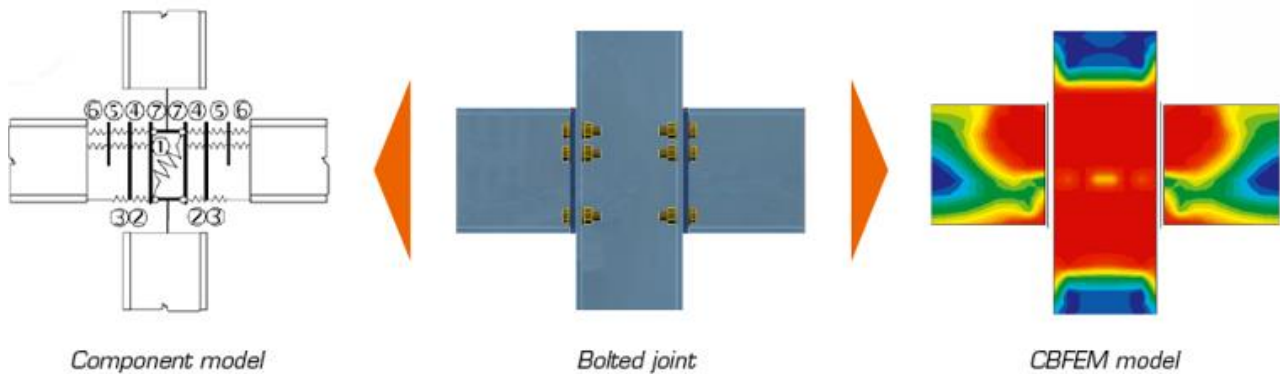


Рис.1. Розрахункова схема з'єднання при застосування компонентного методу СЕ

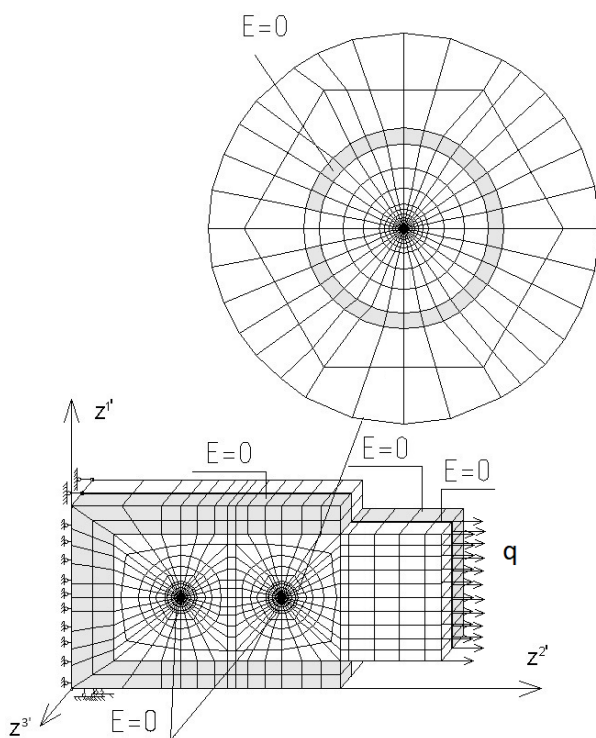


Рис. 2. Розрахункова схема MCE та HMCE

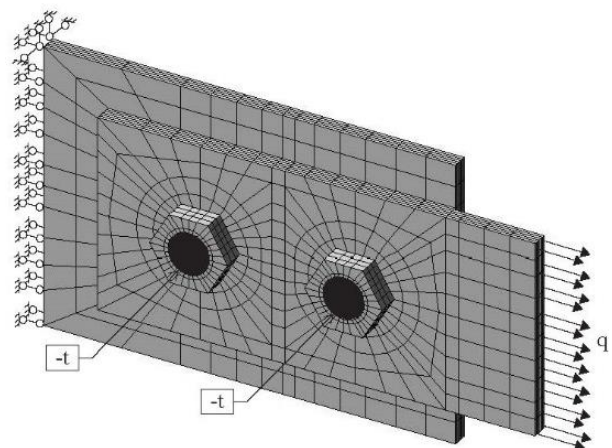


Рис. 3. Розрахункова схема з'єднання при модульованні натягу за допомогою нагрівання

Оскільки Idea StatiCa має обмеження щодо моделювання вузлів, то в порівнянні з статтями [1, 2] закріплення пластини було замінено на вертикальний елемент – двутавр, до якого вже закріплена перша пластина (Пл-1) товщиною 6 мм, до якої прикріплена наступна пластина (Пл-2) також товщиною 6 мм за допомогою двох болтів М16 класу міцності 8.8. До пластини Пл-2 прикладене розтягуюче навантаження 50 кН, рівнодіюча проходить через осі болтів. Марка сталей для елементів прийнята S 355, модуль пружності $E=2.06 \times 10^5$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$. Загальний вигляд кріплення відображено на рис. 4. Характеристики болтів приведено в таблиці 1.

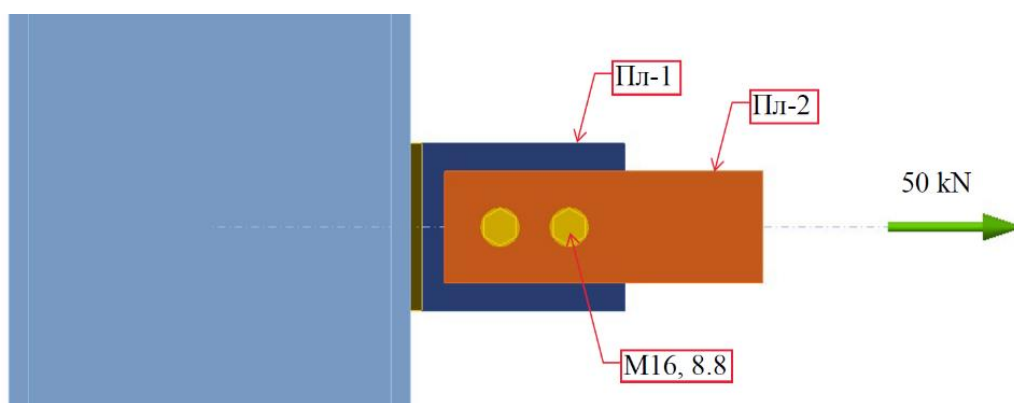


Рис. 4. Розрахункова схема болтового кріплення для ПК Idea StatiCa

Таблиця 1

Характеристики болтів

Назва	$F_{t,Rd}$, [кН]	$B_{p,Rd}$, [кН]	$F_{v,Rd}$, [кН]
M16 8.8 - 1	90.4	112.5	60.3

Розрахунок даного вузла в програмі IDEA StatiCa виконаний на основі нормативних документів EN 1993-1-8: Eurocode 3 [8]. Розрахункова модель та результати розрахунку болтового кріплення наведені на рис. 5.

Зведені загальні результати розрахунку наведено в таблиці 2, результати розрахунку болтів в таблиці 3.

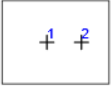
Таблиця 2

Загальні результати розрахунку вузла в програмі IDEA StatiCa

Назва (Name)	Значення (Value)	Статус (Status)
Аналіз (Analysis)	100.0%	OK
Пластини (Plates)	$0.2 < 5.0\%$	OK
Болти (Bolts)	$56.4 < 100\%$	OK
Зварні шви (Welds)	$29.9 < 100\%$	OK
Втрати стійкості (Buckling)	57.41	

Таблиця 3

Результати розрахунку болтів в програмі IDEA StatiCa

	Назва (Name)	Навантаження (Loads)	$F_{t,Rd}$ [кН]	V [кН]	U_{tt} [%]	$F_{b,Rd}$ [кН]	U_{ts} [%]	U_{ts} [%]	Статус (Status)
	B1	LE1	16.9	26.0	18.6	63.6	43.1	56.4	OK
	B2	LE1	0.9	24.0	1.0	63.6	39.8	40.6	OK

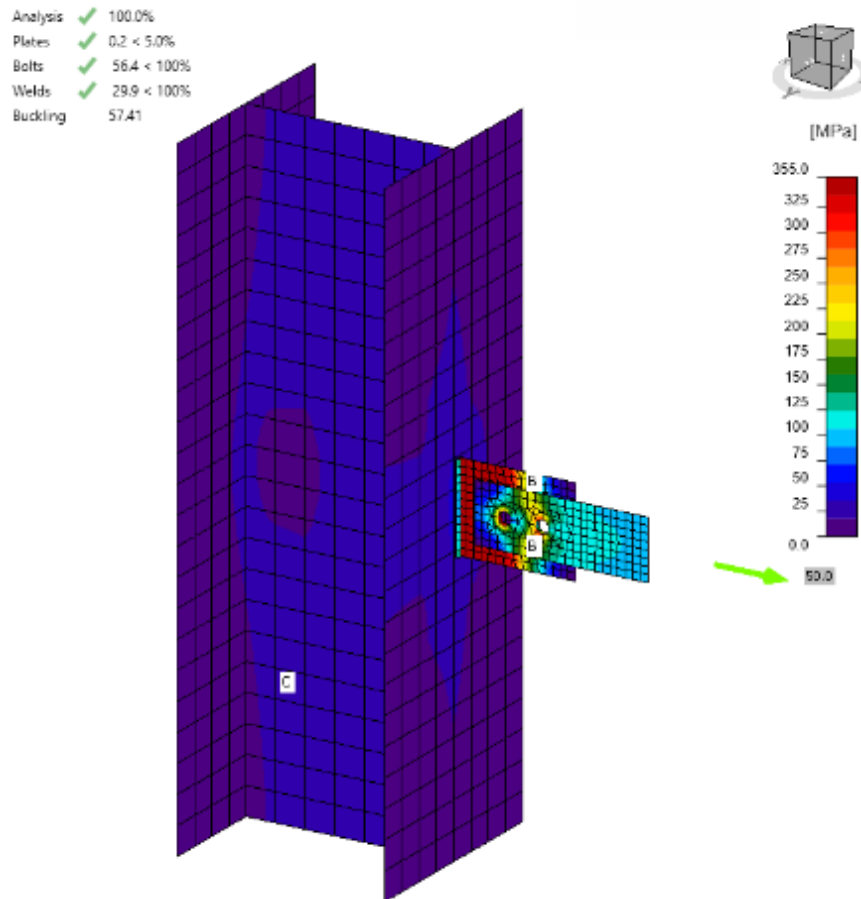


Рис. 5. Розрахункова модель та результати розрахунку болтового кріплення за допомогою ПК Idea StatiCa

Згідно з результатами розрахунку в IDEA StatiCa максимальне значення зусилля, що виникає в одному болту складає 26 кН, а розрахункове зусилля, яке може бути сприйняте одним болтом при зрізі (умовному) болта за EN 1993-1-8 $F_{v,Rd} = 60,3$ кН.

Перевірка опору на розтяг (EN 1993-1-8, табл. 3.4):

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = 90.4 \text{ кН} \geq F_t = 16.9 \text{ кН}, \quad (1)$$

де $k_2 = 0.90$ – коефіцієнт; $f_{ub} = 800.0$ МПа – гранична міцність болта на розтяг; $A_s = 157$ мм² – площа перерізу болта при розтягуванні; $\gamma_{M2} = 1.25$ – коефіцієнт запасу міцності.

Перевірка опору розриву (EN 1993-1-8, табл. 3.4):

$$B_{p,Rd} = 0,6\pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} = 112.5 \text{ кН} \geq F_t = 16.9 \text{ кН}, \quad (2)$$

де $d_m = 25$ мм – середнє значення розмірів між протилежними точками та між протилежними гранями головки болта або гайки, залежно від того, яке менше; $t_p = 6$ мм – товщина; $f_u = 490.0$ МПа – межа міцності; $\gamma_{M2} = 1.25$ – коефіцієнт запасу міцності.

Перевірка стійкості до зсуву (EN 1993-1-8, табл. 3.4):

$$F_{v,Rd} = \frac{\beta_p \alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = 60.3 \text{ кН} \geq V = 26 \text{ кН}, \quad (3)$$

де $\beta_p = 1.00$ – понижуючий коефіцієнт; $\alpha_v = 0.60$ – понижуючий коефіцієнт; $f_{ub} = 800.0$ МПа – гранична міцність болта на розтяг; $A = 157 \text{ мм}^2$ – площа перерізу болта при розтягуванні; $\gamma_{M2} = 1.25$ – коефіцієнт запасу міцності.

Перевірка на опір при стисненні (EN 1993-1-8, табл. 3.4):

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = 63.6 \text{ кН} \geq V = 26 \text{ кН}, \quad (4)$$

де $k_1 = 2.5$ – коефіцієнт для відстані від краю та відстані між болтами, перпендикулярно напрямку передачі навантаження; $\alpha_b = 0.68$ – коефіцієнт для відстані від краю та відстані між болтами в напрямку передачі навантаження; $f_u = 490.0$ МПа – межа міцності; $d = 16$ мм – номінальний діаметр кріплення; $t = 6$ мм – товщина пластини; $\gamma_{M2} = 1.25$ – коефіцієнт запасу міцності.

Взаємодія розтягу та зсуву (%):

$$U_{ts} = \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} = 56.4\% . \quad (5)$$

Використання при розтягу (%):

$$U_t = \frac{F_{t,Ed}}{\min(F_{t,Rd}; B_{p,Rd})} = 18.6\% . \quad (6)$$

Використання при зсуві (%):

$$U_{ts} = \frac{V_{Ed}}{\min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd})} = 43.1\% \quad (7)$$

Згідно з результатами розрахунку, що наведені у статті [2] коефіцієнт використання болта по ДБН складає 0,39, підхід №1 – 0,398. Згідно результатів розрахунку в просторовій постановці коефіцієнт використання болта при моделюванні болтового з'єднання через закріплення переміщень по контуру болта (підхід №2) МСЕ та НМСЕ складає відповідно 0,394 та 0,399. При моделюванні натягу болта зосередженими силами (підхід №3) МСЕ та НМСЕ складає відповідно 0,388 та 0,399. При моделюванні натягу болта навантаженням від рівномірного нагрівання (підхід №4) МСЕ та НМСЕ складає відповідно 0,439 та 0,438. При моделюванні натягу болта розподіленими силами (підхід №5) МСЕ та НМСЕ складає відповідно 0,397 та 0,406. Згідно з результатом розрахунку в IDEA StatiCa коефіцієнт використання болта складає 0,431.

Отримані результати розрахунку зведені в таблицю 4.

Таблиця 4

Порівняння результати розрахунку болтового з'єднання за різними підходами

Перевірка	ДБН [4]	IDEA StatiCa EN	MCE (підхід №1)	підхід №2		підхід №3		підхід №4		підхід №5	
				MCE	HMCE	MCE	HMCE	MCE	HMCE	MCE	HMCE
коефіцієнт використ. болта	0.39	0.431	0.398	0.394	0.399	0.388	0.399	0.439	0.438	0.397	0.401
% порівняно із ДБН	0	9.99	2.03	1.02	2.28	-0.51	2.28	11.82	11.59	1.778	2.78

Отже, отримані результати за різних підходів до моделювання натягу болта а також різних програмних комплексів, та ручного розрахунку дозволяють зробити висновок про незначну різницю розподілення напружень в просторовій постановці MCE, HMCE та Idea StatiCa і дозволили виявити розбіжності в напруженому стані болтового з'єднання для випадку урахування натягу. Особливо варто відзначити збіжність результатів отриманих в Idea StatiCa за нормами EN з результатами моделювання натягу болта навантаженням від рівномірного нагрівання (підхід №4).

Висновок. Отримані результати розрахунку та аналізу вказують на можливість отримати досить велику збіжність результатів розрахунку виконаного на основі HMCE в порівнянні з розрахунком за ДБН та EN, MCE, а також компонентного методу CE.

В той же час в межах HMCE додаткового дослідження потребує створення ефективних підходів та скінченноелементних баз для побудови дискретних моделей просторових металевих вузлів з болтовими з'єднаннями та визначення їх ресурсу при різноманітних початкових умовах. Таким чином, розробка та реалізація об'єктно-орієнтованих ефективних підходів розв'язання цих задач з можливістю урахування контактної взаємодії, пластичних деформацій, вплив початкових дефектів є актуальною проблемою будівельної механіки і представляє практичний інтерес. Дані підходи є підґрунтям для подальшого дослідження болтового з'єднання та дослідження впливу дефектів на ресурс вузлів з використанням HMCE.

Перелік посилань

1. Пискунов, С.О., Мищук, С.В., Мищук, Д.В., & Реп'ях, Ю.М. (2024). Аналіз міцності та розподіл зусиль у металевому з'єднанні при розтязі. *Опір матеріалів і теорія споруд*, (112), 36–42. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.36-42>

2. Пискунов, С.О., Мицюк, С.В., Мицюк, Д.В., & Реп'ях, Ю.М. (2024). Аналіз напруженого стану болтового з'єднання з урахуванням натягу болта. *Опір матеріалів і теорія споруд* (113), 37–44. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.37-44>.
3. WALD, Frantisek, et al. (2021). *Component-based finite element design of steel connections* Czech Technical University Prague.
4. Баженов, В.А., Пискунов, С.О., & Солодей, І.І. (2017). Чисельні дослідження процесів нелінійного статичного і динамічного деформування просторових тіл. *Каравела*.
5. Вабішевич, М.О., & Сторчак, Д.А. (2022). Розв'язання нелінійних контактних задач деформування вузлових з'єднань сталевих конструкцій. *Опір матеріалів і теорія споруд*, (108), 178–188. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.108.178-188>
6. Солодей, І.І., Козуб, Ю.Г., Стригун, Р.Л., & Шовківська, В.В. (2022). Чисельний аналіз напружено-деформованого стану трубчастого елемента при термосиловому навантаженні. *Опір матеріалів і теорія споруд*, (109), 109–119. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.109-119>
7. Frederick F. Ling. (2007). *Contact Stresses and Deformations, ME EN 7960-Precision Machine Design Topic 7*.
8. *EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures*.
9. *ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування*.

ABSTRACT

Purpose. The objective is to assess the accuracy and convergence of different approaches to calculating bolted connections, particularly the finite element method (FEM), the semi-analytical finite element method (SAFEM), analytical calculations, and the IDEA StatiCa. Additionally, the study examines the stress state of bolts while considering pretension.

The methods. The study is based on an analysis of the results obtained from different modeling approaches for bolt pretension. The calculations were conducted using FEM, SAFEM, the IDEA StatiCa software package, which follows EN standards, as well as analytical calculations in accordance with the construction standards of DBN and EN.

Findings. A minor difference in stress distribution was found between the FEM, SAFEM, and IDEA StatiCa methods. However, discrepancies were identified in the stress state of the bolted connection when considering pretension. The convergence of results between IDEA StatiCa calculations under EN standards and bolt pretension modeling via uniform heating was confirmed. The feasibility of using SAFEM for the calculation of steel joints with bolted connections was substantiated in comparison with DBN, EN, FEM, and the component method of FEM.

The originality. Within the framework of a comparative analysis of bolted connection calculations using different approaches to modeling bolt pretension, it was established that the difference in stress distribution between the FEM and SAFEM approaches, as well as between IDEA StatiCa and other methods, is insignificant. The obtained patterns confirm the validity of using SAFEM to assess the stress state of bolted connections. The convergence of results obtained in IDEA StatiCa under EN standards with bolt pretension modeling via uniform heating was established.

Practical implementation. The obtained results confirm the feasibility of using SAFEM for analyzing bolted connections in steel structures, allowing for improved design accuracy and service life assessment. The observed convergence of results obtained in IDEA StatiCa with numerical modeling methods contributes to the improvement of calculation methodologies that consider bolt pretension.

Keywords: *finite element method, semi-analytical finite element method, IDEA StatiCa, bolted connection, convergence.*

© Д.О. Довгаль¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

**ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОСТОРОВИХ ФОРМ ЗРІЗІВ, УТВОРЮВАНИХ РІЗЦЯМИ
ПЛАНЕТАРНО-ТОРОВИХ ВИКОНАВЧИХ ОРГАНІВ
ПОРОДОРУЙНУВАЛЬНИХ МАШИН**

© D. Dovhal¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**GEOMETRIC AND COMPUTER MODELING OF SPATIAL CUT SHAPES
FORMED BY THE CUTTERS OF PLANETARY-TOROIDAL EXECUTIVE
UNITS OF ROCK-DESTRUCTION MACHINES**

Мета. Метою роботи є розробка геометричної та комп'ютерної моделі процесу формування зрізу різцем планетарно-торового виконавчого органу (ПТВО) породоруйнувальної машини, а також визначення і аналіз основних параметрів зрізу залежно від характеристик планетарного механізму для підвищення ефективності руйнування гірничого масиву та зниження енерговитрат процесу.

Методика. Основною для розробки геометричної моделі зрізу став геометричний аналіз рівнянь руху різця з урахуванням кінематичних особливостей ПТВО. Для перевірки розрахунків було проведено комп'ютерне моделювання та візуалізація процесу зрізоутворення у системі SolidWorks. Числовий аналіз форм зрізів та вплив кінематичних параметрів ПТВО на параметри зрізів виконано засобами системи MATLAB.

Результати. Розроблено геометричну модель формоутворення зрізів. Отримано залежності товщини зрізу від кута повороту водила та передавального числа, виконано комп'ютерне моделювання процесу зрізоутворення. Визначено вплив основних параметрів ПТВО на рівномірність зрізу, а також запропоновано методику оптимізації параметрів руху різця для зменшення коливань товщини зрізу й підвищення ефективності процесу руйнування.

Наукова новизна. Отримано нові наукові результати, що розширюють розуміння процесу формування зрізів різцями ПТВО. Основна новизна дослідження полягає у розробленні геометричної та комп'ютерної моделі формування зрізів, отриманні залежностей товщини зрізу від основних параметрів ПТВО, виконанні комплексного моделювання процесу зрізоутворення, а також розробленні рекомендацій щодо зменшення нерівномірності товщини зрізу.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні та вдосконаленні ПТВО для підвищення ефективності процесу різання. Отримані аналітичні залежності та комп'ютерні моделі дозволяють оптимізувати кінематичні параметри руху різця, що сприяє зменшенню нерівномірності товщини зрізу, зниженню енерговитрат та підвищенню зносостійкості інструменту.

Ключові слова: породоруйнувальні машини, планетарно-торовий виконавчий орган, геометричне моделювання, комп'ютерне моделювання, кінематика руху різця, епіциклоїдальна траєкторія, товщина зрізу, передавальне число, оптимізація параметрів різання.

Вступ. Руйнування гірничого масиву механічними породоруйнівними машинами є основним процесом у видобувній промисловості. Планетарно-торовий виконавчий орган (ПТВО) широко застосовується у прохідницьких та очисних