

УДК 539.3

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ НАТЯГУ БОЛТА

С.О. Пискунов¹,
д-р техн. наук, професор

С.В. Мицюк²,
канд. техн. наук, доцент

Д.В. Мицюк²,
аспірант

Ю.М. Реп'ях²,
аспірант

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
03056, м. Київ, Берестейський просп., 37

²Київський національний університет будівництва і архітектури
03680, м. Київ, Україна, проспект Повітряних Сил, 31

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.37-44

В статті проведено розрахунок вузла болтового з'єднання при використанні різних підходів до моделювання початкового натягу болтів у з'єднанні та порівняльний аналіз результатів. Моделювання виконано на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ) та МСЕ в просторовій постановці.

Ключові слова: напіваналітичний метод скінченних елементів, метод скінченних елементів, болтове з'єднання, контактні напруження, коефіцієнт концентрації напружень, навантаження від рівномірного нагрівання.

Вступ. Одним із найбільш відповідальних та важливих моментів при розрахунку конструкції є розрахунок елементів з'єднання вузлів, оскільки від точності та достовірності цих результатів залежить надійність конструкції в цілому.

Для зменшення трудовитрат при розрахунку елементів вузлів досить часто спрощують розрахункові схеми, але такий підхід інколи не дозволяє в повній мірі проаналізувати розподіл зусиль, що для окремих типів конструкцій може бути критичним. Болтові з'єднання мають досить багато переваг перед іншими (зварними, заклепковими та ін.) типами з'єднань, а саме високу технологічність, надійність, швидкість монтажних робіт. Існує багато підходів до моделювання болтів. Розглянемо деякі із них і проведемо співставлення результатів. Деякі із варіантів моделювання болтових з'єднань методом скінченних елементів розглянуті, наприклад, в роботах [8, 14].

При виконанні монтажу часто створюється початковий натяг болта, що вносить додаткові складові у напружений стан з'єднання. Надалі будемо розглядати різні підходи до моделювання початкового натягу болтових з'єднань.

В якості верифікації результатів розрахунку будемо використовувати результати розрахунку в програмному комплексі ЛІРА САПР.

Наразі одним з найбільш ефективних засобом чисельного моделювання напружено-деформованого стану просторових тіл, які включають в тому числі з'єднання виконані за допомогою болтів, можна вважати напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ) [1, 3, 9, 13]. Ефективність застосування НМСЕ щодо задач механіки деформівного твердого тіла показана в роботах [1, 3, 5, 10, 13].

Метою даного дослідження є числовий аналіз напруженого стану та порівняння результатів розподілення зусиль в болтовому з'єднанні при різних підходах моделювання болтів та його натягу, отриманих на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ) та методу скінченних елементів (МСЕ).

1. Постановка задачі

Розглядається болтове з'єднання двох пластин товщиною 6 мм двома болтами М16 класу міцності 8.8. [7] Розміри першої пластини (Пл-1) становлять 0.1 x 0.16 м (висота), розміри другої пластини (Пл-2) яка прикріплюється до першої - 0.51 x 0.075 м (висота). Загальний вигляд з'єднання показаний на рис. 1.

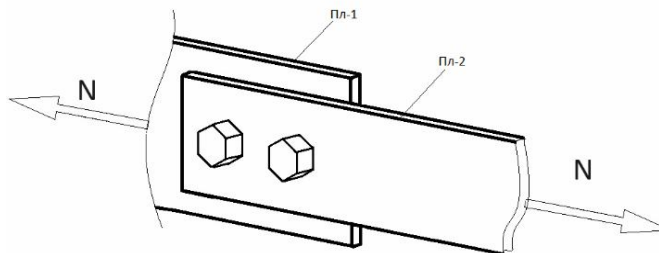


Рис. 1

З'єднання звантажено розтягуючим навантаженням, рівнодіюча якого проходить через вісь болтів, таким чином напружений стан пластин відповідає рівномірному розтягу. Зусилля розтягу, що передає з'єднання, становить $N=50$ кН. Матеріал пластин – сталь, модуль пружності $E=2.06 \times 10^5$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$.

Аналогічно як в статті [7], для первісної оцінки розмірів області збурення напруженого стану і концентрації напружень навколо з'єднання, проведений попередній розрахунок при різних варіантах моделювання болтів. Для подальших розрахунків із визначення просторового напруженого стану використана розрахункова схема показана на рис. 2, яка передбачає звантаження торця пластини 1 рівномірно розподіленим навантаженням вздовж напрямку дії сили і закріплення торця пластини 2 від переміщень в цьому ж напрямку (рис. 2 - рис. 4).

Підходи до моделювання болтів та натягу із використанням просторових скінченних елементів, які розглянемо, зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Підхід, №	Моделювання спільної роботи елементів з'єднання	Моделювання натягу болта
1	моделювання болта через об'єднання переміщень в вузлах, [7]	без урахування натягу
2	моделювання болта через закріплення переміщень по контуру болта, [7]	
3	моделювання натягу болта	зосередженими силами, прикладеними по осі болта (рис. 2)
4		навантаженням від рівномірного нагрівання (рис. 3)
5		розподіленими силами, прикладеними по площі поперечного перерізу болта (рис. 4)

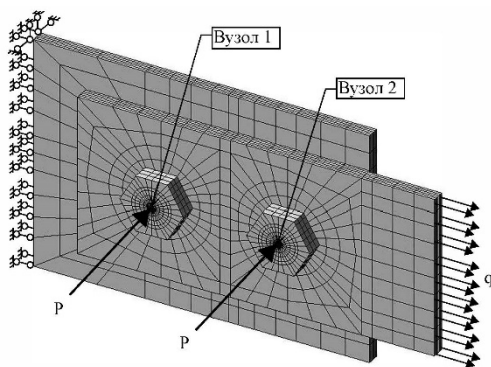


Рис. 2

Розрахункові схеми в яких болти змодельовані за допомогою об'єднання переміщень в вузлах (підхід №1) та закріпленням переміщень головки болта та гайки (підхід №2) детально розглянуті в статті [7].

Розрахунок на основі МСЕ виконувався в програмному комплексі ЛІРА САПР з використанням універсальних просторових восьмивузлових ізопараметричних СЕ, в тому числі для моделювання головки болта та гайки.

Модуль пружності СЕ, що потрапляють в зазор між тілом болта та пластинами,

привірюювався до нуля ($E=0$), див. рис. 4 (вузол [7].

Розрахункову схему, в якій натяг болта моделюється зосередженими силами прикладеними по осі болта в вузлах 1 та 2, наведено на рис. 2. Значення зосереджених сил приймаємо рівним зусиллю натягу болтів

$$B_0 = 0.9 \times R_{bh} \times A_{bh} = 0.9 \times 560 \times 157 = 79.1 \text{ кН},$$

де, згідно ДБН В.2.6-198_2014, [3]: $R_{bh} = 0.7 \times R_{bun} = 0.7 \times 800 = 560 \text{ Н/мм}^2$ – розрахунковий опір розтягу болта; $A_{bh} = 157 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу болта за різьбою.

Розрахункову схему, в якій натяг болта моделюється навантаженням від рівномірного нагрівання, наведено на рис. 3. Значення навантаження від рівномірного нагрівання приймаємо таким, що дорівнює зусиллю, яке спричинить абсолютне видовження болта, обчисленого за величиною температурної деформації ε_T

$$\varepsilon_T = \alpha \times \Delta T \text{ Н},$$

де $\alpha = 0.000012$ – коефіцієнт лінійного теплового розширення для сталі, $1/^\circ\text{C}$; ΔT – зміна температури, $^\circ\text{C}$.

Напруження і відповідні їм зусилля визначаються за формулами:

$$\sigma = E \times \varepsilon_T,$$

$$P = \sigma A,$$

де $A = 0.00021 \text{ м}^2$ – площа поперечного перерізу болта.

Відповідно

$$\Delta T = \frac{P}{E \alpha A} = \frac{79.1}{2.06 \times 10^8 \times 0.000012 \times 0.00021} = 153^\circ\text{C}.$$

Розрахункову схему, в якій натяг болта моделюється розподіленими силами, прикладеними по площі поперечного перерізу болта, наведено на рис. 4. Значення рівномірно-розподілених сил приймаємо рівним

$$q_1 = \frac{B_0}{A_b} = \frac{79.1}{201} = 0.394 \text{ кН/мм}^2,$$

де $A_b = 201 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу болта.

Для моделювання болтового з'єднання в схемі з просторовими восьмивузловими ізопараметричними СЕ при використанні МСЕ в елементах, що потрапляють в зазор між тілом болта та пластинами, модуль пружності привірюювався до нуля ($E=0$).

В розрахунковій схемі НМСЕ зазор між болтом та тілом пластин як і в схемі МСЕ моделюється привірююванням до нуля модуля пружності (рис. 5).

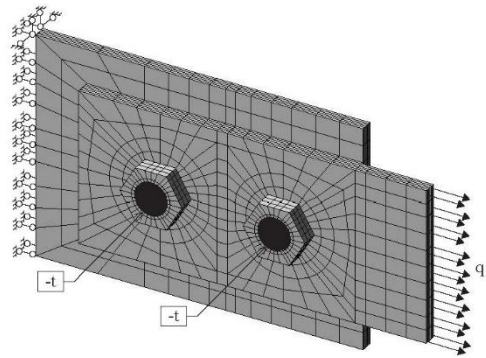


Рис. 3

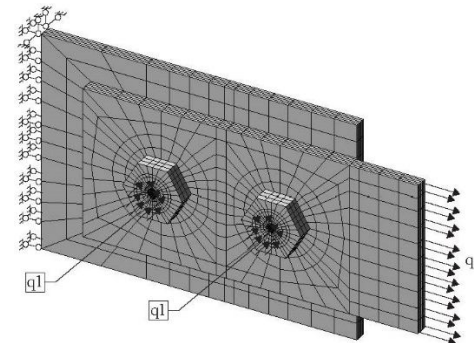


Рис. 4

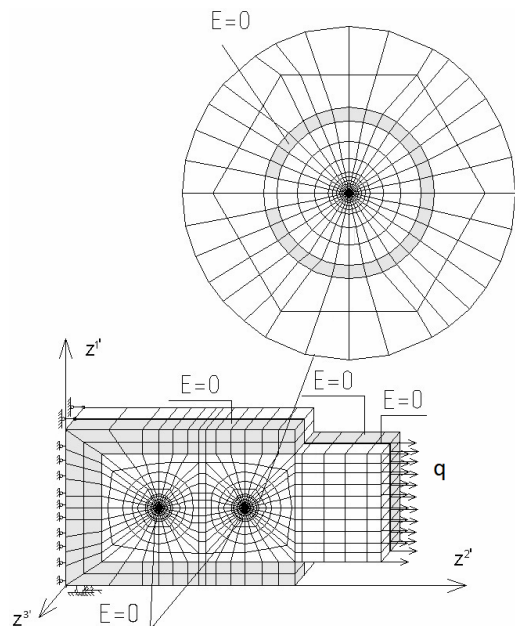


Рис. 5

2. Результати розрахунку і їх аналіз

Результати розрахунку першого та другого підходу, в яких болти змодельовані за допомогою об'єднання переміщень в вузлах та закріпленням переміщень головки болта та гайки, прийняті із статті [7].

Результати розрахунків на основі МСЕ та НМСЕ отримані в даній статті, в яких болти змодельовані та гайки просторовими елементами а також результати згідно статті [7] наведені нижче у вигляді графіків співставлення величин еквівалентних напружень в характерних точках, що розташовані вздовжвісі z^3 по центру болтів (рис. 6 для точки 1, та рис. 7 для точки 2), а також вздовж вісі z^2 пластини ПЛ-1 (рис. 8).

Як можна побачити напруження вздовж болта, головки болта та гайки для схеми, в якій

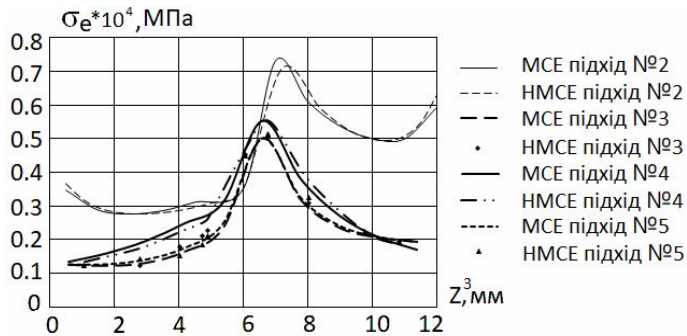


Рис. 6

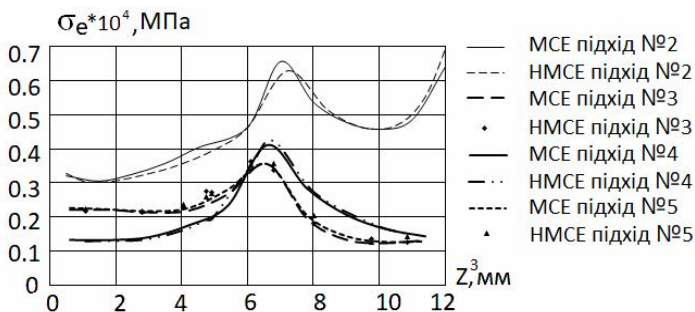


Рис. 7

моделювання виконувалось просторовими елементами, а натяг болта моделювався зосередженими силами (підхід №3), навантаженням від рівномірного нагрівання (підхід №4) та розподіленими силами (підхід №5) мають менші значення екстремумів та більш плавний вигляд кривої напруження на графіку, ніж результати для схем при моделюванні болтового з'єднання через об'єднання переміщень в вузлах (підхід №1) [7] та закріпленням переміщень по контуру болта (підхід №2) [7]. Таким чином, розрахунки із використанням підходів №1 і №2 можна вважати такими, що забезпечують більші запаси міцності (більш консервативними). Кількісна відмінність еквівалентних напружень в точці їх

максимальних значень, обчислена по відношенню до результатів підходу № 2, досягає 25% для болта, де розташована точка 1 і 35% – для болта, де розташована точка 2. Ще більші відмінності напружень (у відсотках) спостерігаються між значеннями, отриманими для підходу №2 та підходами №№ 3-5 в точках, наближених до кінців болта, хоча напруження в цій зоні не є визначними для міцності болтів. В цілому ж варто відмітити, що якісний вигляд розподілень напружень має схожий вигляд.

Розподілення напружень вздовж болта, отримані МСЕ та НМСЕ при використанні кожного з розглянутих підходів відрізняються в межах 2 % (рис. 4), в саме: для підходу №2 різниця в межах 1.89% [7], для підходу №3 – 0.6%, для підходу №4 – 0.4%, для підходу №5 – 1,98%, що свідчить про високу точність НМСЕ.

Відмінність в напруженнях по пластині складають між МСЕ та НМСЕ в деяких точках до 1.5%, в той же час, різниця в розрахунку з використанням універсальних чотирикутних СЕ та просторовій постановці (НМСЕ та МСЕ) складають в точках біля болта досить велику різницю (891 МПа та 725 МПа відповідно, рис. 8). При використанні підходів моделювання натягу болта у відповідності з таблицею 1, максимальні напруження суттєво зменшуються та складають 371 МПа. Згідно результатів розрахунку отриманих в даній статті та в статті [7] було проведено порівняльний аналіз коефіцієнтів використання болта по ДБН, МСЕ та НМСЕ.

Як було наведено в статті [7], в зонах контактів болтів з пластинами виникають контактні напруження, які мають місцевий характер і досить швидко зменшуються при віддаленні від місця дотику. Для аналізу напружень в зоні контакту вводиться коефіцієнт концентрації напружень $m=0,62$ [5, 11].

Враховуючи тимчасовий опір сталі болта класу міцності 8.8 $\sigma_b=800$ МПа та вищезгаданий коефіцієнт концентрації напружень допустиме напруження складе $800/0.62=1290$ МПа.

Коефіцієнт використання болта по ДБН складає 0,39, при моделюванні із застосуванням універсальних чотирикутних СЕ (підхід №1) - 0,398.

Згідно результатів розрахунку в просторовій постановці при різних підходах до моделювання болтів 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, в даному випадку для аналізу було взяте усереднене значення напружень, так як обмеження переміщень створюють додаткові концентрації напруження в болті, даний підхід в інших типах вузлів потребує додаткового вивчення. 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. Також варто відзначити, що величина натягу болта має досить важливе значення, оскільки з'єднання може вийти з ладу, якщо натяг буде задано занадто низьким або нерівномірним для кожного болта. Нерівномірний натяг болта може призвести до того, що деякі болти будуть ослаблені, а інші перевантажені [11, 12].

Отримані результати розрахунку зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Перевірка	ДБН [4]	МСЕ (підхід №1)	підхід №2		підхід №3		підхід №4		підхід №5	
			МСЕ	НМСЕ	МСЕ	НМСЕ	МСЕ	НМСЕ	МСЕ	НМСЕ
коефіцієнт використання болта	0.39	0.398	0.394	0.399	0.388	0.399	0.439	0.438	0.397	0.401
% порівняно із ДБН	0	2.03	1.02	2.28	-0.51	2.28	11.82	11.59	1.778	2.78

Отже значення коефіцієнтів використання болта згідно розрахунку виконаного по ДБН, МСЕ із застосуванням універсальних чотирикутних СЕ, МСЕ в просторовій постановці та НМСЕ використовуючи різні методи моделювання болта показують досить високу збіжність результатів.

Висновок. Отримані результати розрахунку та аналізу вказують на те, що моделювання натягу болта зосередженими силами (підхід №3), навантаженням від рівномірного нагрівання (підхід №4) та розподіленими силами (підхід №5) як МСЕ так і НМСЕ дають досить високу збіжність з розрахунком по ДБН та при моделюванні із застосуванням універсальних чотирикутних СЕ (підхід №1). Додаткової уваги та дослідження потребує схема в якій моделюванні болтового з'єднання виконується через закріплення переміщень по контуру болта (підхід №2), так як в цій схемі виникають додаткові концентрації напружень в болтах через обмеження переміщень, а

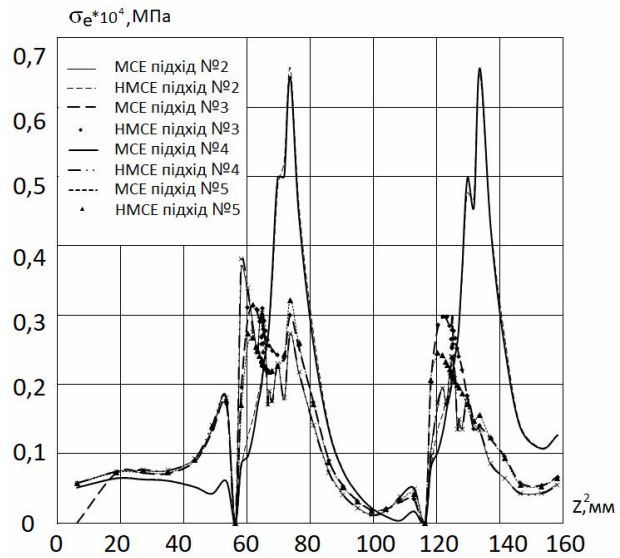


Рис. 8

також схем з натягом болта (підходи №3-5), яким чином натяг болта впливає на міцність з'єднання.

Крім того використання напіваналітичного методу скінчених елементів дозволяє отримати досить точні результати, та розраховувати нестандартні вузли складної форми, при цьому використовуючи різні підходи до задання натягу болтів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баженов В.А., Пискунов С.О., Солодей І.І. Чисельні дослідження процесів нелінійного статичного і динамічного деформування просторових тіл // К.: Каравела, 2017. – 305 с.
2. Будур О.І., Білогуров В.Д. Сталеві конструкції. Довідник конструктора. – К.: Сталь, 2004.-210 с.
3. Вабіщевич М.О., Сторчак Д.А. Розв'язання нелінійних контактних задач деформування вузлових з'єднань сталевих конструкцій // Опір матеріалів і теорія споруд. –К.:КНУБА. - Вип.108, 2022. - С. 178-179.
4. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування.
5. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. Підручник.-2-ге вид., допов. І переробл. – К.: Вища шк., 2004. -655с.
6. Пискунов С.О., Мицюк С.В., Андрієвський В.П., Мицюк Д.В. Порівняльний аналіз результатів розрахунку рамного вузла у програмному засобі IDEA STATICA CONNECTION та за методиками нормативних документів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 31-39.
7. Пискунов С.О., Мицюк С.В., Мицюк Д.В., Реп'ях Ю.М. Аналіз міцності та розподіл зусиль у металевому з'єднанні при розтязі. // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 36-42.
8. Рудаков К.М., Шукаєв С.Н. Моделирование болтовых соединений из ПКМ в программном комплексе FEMAP/NX NASTRAN. //Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute", №67, 2013, С. 199-206.
9. Солодей І.І., Козуб Ю.Г., Стригун Р.Л., Шовківська В.В. Чисельний аналіз напружено-деформованого стану трубчастого елемента при термосиловому навантаженні // Опір матеріалів і теорія споруд. –К.:КНУБА, Вип.109, 2022, С. 109-119.
10. Bazhenov V.A., Pyskunov S.O., Maksym'yuk Yu.V., Mytsyuk S.V. Effect of geometric nonlinearity on the life of a herring bone lock joint in creep // *Opir materialiv*, 2022, Vol. 54, No. 3, pp.372-376.
11. Bolt Pretension Object. Modeling the Bolt and Preload. Ansys //https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2020/10/2.2.3_Bolt-Pretension-Object_new_brand.pdf
12. Bolting theory. Function of Bolts and Nuts // https://www.enerpac.com/en-us/training/e/bolting-theory?srsltid=AfmBOOpwGyGRyt4MitEu1u7WnYTTinclFx4jnmsWYgPoP5gGSBoQ31
13. Frederick F. Ling. Contact Stresses and Deformations, ME EN 7960-Precision Machine Design Topic 7, 2007.
14. Williams B.J. National Agency for Finite Element Methods&Standards //Great Britain, NAFEMS, 2020, pp.123.

REFERENCES

1. Bazhenov V.A., Pyskunov S.O., Solodei I.I. Chyselni doslidzhennia protsesiv nelineinoho statychnoho i dynamichnoho deformuvannya prostorovykh til (Numerical studies of the processes of nonlinear static and dynamic deformation of spatial bodies) // К.: Karavela, 2017. – 305 p.
2. Budur O.I., Bilohurov V.D. Stalevi konstruktсии. Dovidnyk konstruktora (Steel structures. Designer's Handbook). – К.:Stal, 2004.-210 P.
3. Vabishchevych M.O., Storzhak D.A. Solution of nonlinear contact problems of deformation of nodal connections of steel structures// *Strength of Materials and Theory of Structures: scientific and technical collection* - Kyiv: KNUBA, 2022. - Issue 108. - P. 178-179.
4. DBN V.2.6-198:2014 Stalevi konstruktсии. Normy proektuvannia (Steel structures. Design standards).
5. Pysarenko H.S., Kvitka O.L., Umanskiy E.S. Opir materialiv. Pidruchnyk (Strength of Materials. Textbook)-2 edition, dopov. I pererobl. – К.: Vyshchashk., 2004. -655 P.
6. Piskunov S.O., Mitsiuk S.V., Andrievsky V.P., Mitsiuk D.V. Comparative analysis of the results of calculation of the frame assembly in the IDEA STATICA CONNECTION software and according to the methods of regulatory documents // *Strength of Materials and Theory of Structures: scientific and technical collection* - Kyiv: KNUBA, 2022. - Issue 109. - P. 31-39.
7. Piskunov S.O., Mitsiuk S.V., Mitsiuk D.V., Repiakh Y. Strength analysis and force distribution in a tensile metal // *Strength of Materials and Theory of Structures: scientific and technical collection* - Kyiv: KNUBA, 2022. - Issue 112. - P. 36-42.
8. Rudakov K.M., Shukaev S.N.. Modeling of boltedjoints made of PCM in FEMAP/NX NASTRAN softwarepackage. // *Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, №67, 2013, P. 199-206.
9. Solodei I.I., Kozub Yu.H., Stryhun R.L., Shovkivska V.V. Algorithms analysis for solving geometrically nonlinear mechanics problems in the scheme of the semi-analytical finite element method // *Strength of Materials and Theory of Structures: scientific and technical collection* - Kyiv: KNUBA, 2022. - Issue 109. - P. 109-119.
10. Bazhenov V.A., Pyskunov S.O., Maksym'yuk Yu.V., Mytsyuk S.V. Effect of geometric nonlinearity on the life of a herring bone lock joint in creep // *Strength of Materials*, 2022, Vol. 54, No. 3, pp. 372-376.
11. Bolt Pretension Object. Modeling the Bolt and Preload. Ansys //https://innovationspace.ansys.com/courses/wp-content/uploads/sites/5/2020/10/2.2.3_Bolt-Pretension-Object_new_brand.pdf
12. Bolting theory. Function of Bolts and Nuts // https://www.enerpac.com/en-us/training/e/bolting-theory?srsltid=AfmBOOpwGyGRyt4MitEu1u7WnYTTinclFx4jnmsWYgPoP5gGSBoQ31
13. Frederick F. Ling. Contact Stresses and Deformations, ME EN 7960-Precision Machine Design Topic 7, 2007.
14. Williams B.J. National Agency for Finite Element Methods&Standards //Great Britain, NAFEMS, 2020, pp.123.

Пискунов С.О., Мицюк С.В., Мицюк Д.В., Реп'ях Ю.М.

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ НАТЯГУ БОЛТА

Одним із найбільш відповідальних та важливих моментів при розрахунку конструкції, є розрахунок елементів з'єднання вузлів, так як від точності та достовірності результатів розрахунку залежить надійність конструкції загалом. Для зменшення трудовитрат при розрахунку елементів вузлів досить часто спрощують розрахункові схеми, але такий підхід інколи не дозволяє в повній мірі проаналізувати розподіл зусиль, що для окремих типів конструкцій може бути критичним. Основними типами з'єднань являються зварні, заклепкові та болтові. Болтові з'єднання мають досить багато переваг перед іншими типами з'єднань, а саме: високу технологічність, надійність, швидкість монтажних робіт, тому надалі будемо розглядати різні підходи моделювання болтових з'єднань.

Наразі одним з найбільш ефективних і найменш трудомістким засобом чисельного моделювання напружено-деформованого стану просторових тіл, які включають в тому числі з'єднання виконанні за допомогою болтів, можна вважати напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ).

Моделювання болта, головки болта та гайки виконувалось просторовими елементами, а натяг болта моделювався зосередженими та розподіленими силами та навантаженням від рівномірного нагрівання, об'єднання переміщень в вузлах та закріпленням переміщень по контуру.

Отримані результати за різних підходах до моделювання натягу болта дозволяють зробити висновок про незначну різницю розподілення напружень в просторовій постановці МСЕ та НМСЕ та дозволили виявити розбіжності в напруженому стані болтового з'єднання для випадку урахування натягу.

Ключові слова: напіваналітичний метод скінченних елементів, метод скінченних елементів, болтове з'єднання, контактні напруження, коефіцієнт концентрації напружень, навантаження від рівномірного нагрівання.

Pyskunov S.O., Mityuk S.V., Mityuk D.V., Repiakh Y.M.

ANALYSIS OF THE STRESS STATE OF THE BOLTED JOINT TAKING INTO ACCOUNT THE BOLT TENSION

One of the most crucial and important points in the design of a structure is the calculation of the connection elements of the nodes, since the reliability of the structure as a whole depends on the accuracy and reliability of the calculation results. Designs schemes are often simplified to reduce labor costs in the calculation of node elements, but this approach sometimes does not allow for a full analysis of the distribution of forces, which can be critical for certain types of structures. The main types of joint are welded, riveted and bolted. Bolted joint have many advantages over other types, namely: high manufacturing ability, reliability, and speed of installation work. The various approaches to modeling of bolted joint are considered and compared in this paper.

Currently, one of the most effective and least time-consuming means of numerical modeling of the stress-strain state of spatial bodies, including bolted joint, can be considered a semi-analytical finite element method (SFEM).

The bolt body, bolt head and nut were modeled by spatial elements, and the bolt tension was modeled by concentrated and distributed forces and the load from uniform heating, combining displacements in the nodes, and fixing displacements along the contour.

Results obtained with different approaches to modeling bolt tension allow us to conclude that there is a slight difference in the stress distribution in the spatial formulation of the FEM and SFEM and made it possible to detect discrepancies in the stressed state of the bolted joint for the case of taking bolt tension into account.

Keywords: semi-analytical finite element method, finite element method, bolted joint, contact stresses, stress concentration factor, uniform heating load.

УДК 539.3

Пискунов С.О., Мицюк С.В., Мицюк Д.В., Реп'ях Ю.М. Аналіз напруженого стану болтового з'єднання з урахуванням натягу болта // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2024. – Вип. 113. – С. 37-44. – Англ.

Стаття присвячена дослідженню болтового з'єднання з різними підходами до моделювання болтів та їх натягу, отриманих на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (SFEM) та методу скінченних елементів (FEM).

Табл. 3. Іл. 8. Бібліогр. 14 назв.

UDC 539.3

Pyskunov S.O., Mityuk S.V., Mityuk D.V., Repiakh Y.M. Analysis of the stress state of the bolted connection taking into account the bolt tension // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2024. – Issue 113. – P. 37-44.

The article is devoted to the study of a bolted connection with different approaches to modeling bolts and their tension obtained on the basis of the semi-analytical finite element method (SFEM) and the finite element method (FEM).

Tabl. 3. Figs. 8. Refs. 14.

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Пискунов Сергій Олегович.

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ, просп. Берестрейський, 37, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів, Пискунов Сергій Олегович.

Роб. тел.: +38(044) 241-5555

Мобільний тел.: +38(050) 962-66-14

E-mail: s.piskunov@ua.fm

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3987-0583>

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри будівельної механіки КНУБА Мицюк Сергій Вікторович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Мицюк Сергій Вікторович

Роб. тел. +38(044) 241-5555

Мобільний тел.: +38(096) 931-74-42

E-mail: serewka@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6481-4036>

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): аспірант кафедри будівельної механіки КНУБА Мицюк Дмитро Вікторович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Мицюк Дмитро Вікторович

Роб. тел. +38(044) 235-1333

Мобільний тел.: +38(098) 062-28-52

E-mail: mytsiuk.d.v@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3583-8052>

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): аспірант кафедри будівельної механіки КНУБА Реп'ях Юрій Миколайович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Реп'ях Юрій Миколайович.

Роб. тел. +38(044) 241-5555

Мобільний тел.: +38(097) 774-55-34

E-mail: feodos84@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-9995-6334>