

УДК 539.3

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІТИЧНОГО ПІДХОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ НМСЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

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
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, Україна. 03037

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.3-10

В статті проведено розрахунок вузла болтового з'єднання двох пластин при використанні підходу до моделювання початкового натягу болтів у з'єднанні та порівняльний аналіз результатів із експериментальними даними.

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

Вступ

Для широкого кола задач при розрахунках досить часто використовується метод скінченних елементів (МСЕ). Це числовий метод зарекомендував себе як один із найбільш розповсюджених та універсальних. При розрахунку елементів з'єднувальних елементів вузлів, таких як болти, заклепки і т.д. використовуються, як правило, спрощені розрахункові схеми, але такий підхід не дає можливість повного аналізу розподілу зусиль. Для повного аналізу необхідно створювати детальні просторові моделі, що в свою чергу призводить до потреби в розв'язанні систем рівнянь високих порядків. Для підвищення ефективності МСЕ виникає необхідність його поєднання з методом розділення невідомих. Один з таких підходів називається напіваналітичним методом скінченних елементів (НМСЕ). Ефективність застосування НМСЕ щодо широкого кола задач механіки деформівного твердого тіла показана в роботах [1, 2, 3, 8, 11].

Висока ефективність напіваналітичного варіанта в порівнянні з традиційним МСЕ зумовлена, у класичному випадку, зведенням просторової задачі до ряду двовимірних. Сучасні досягнення напіваналітичного метода скінченних елементів в статичних та квазістатичних задачах теорії пружності і пластичності [1, 8], задачах повзучості, континуального та дискретного руйнування описані в [1, 8].

Одним з питань, яке ускладнює моделювання напружено-деформованого стану болтових з'єднань є натяг у з'єднанні. В попередніх роботах [4, 5] авторами було запропоновано методики, які дозволяють проводити моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням переднапруженого стану, який виникає внаслідок натягу, при використанні методу скінченних елементів та реалізації цих підходів у напіваналітичному методі скінченних елементів.

Метою даного дослідження є порівняння отриманих в роботах [4, 5] результатів з експериментальними даними [12].

1. Вихідні співвідношення теорії пружності НМСЕ

Для розгляду неоднорідних призматичних тіл використовується базисна декартова система координат. Відповідний неоднорідний призматичний СЕ може бути отриманий переміщенням чотирикутника довільної форми вздовж прямолінійної утворюючої (рис. 1). Місцева система координат застосовується для визначення деформацій та напружень у межах СЕ.

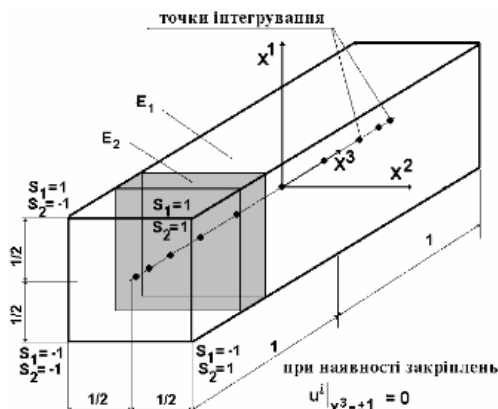


Рис. 1

Торці елемента можуть бути довільно закріплені від переміщень в напрямках $z^{i'}$. Вздовж осі елемента, згідно з вимогами формули інтегрування Гаусса, розташована деяка кількість точок інтегрування K_m , $m=1, 2, \dots, M$ [1, 7].

Розподілення переміщень в межах поперечного перерізу СЕ описується білінійним законом:

$$u_{m'} = \sum_{S_1=\pm 1} \sum_{S_2=\pm 1} u_{m'(S_1 S_2)} \left((1/2)S_1 x^1 + (1/2)S_2 x^2 + S_1 S_2 x^1 x^2 + (1/4) \right),$$

а в напрямку утворюючої для апроксимації переміщень використовується розкладення за системою координатних функцій $\varphi^{(l)}$, утвореної на основі поліномів Лагранжа і Міхліна [1]:

$$u_{m'} = \sum_{l=0}^L \bar{u}_{m'}^l \varphi^{(l)},$$

де

$$\varphi^{(0)} = (1/2)(1 - x^3), \quad \varphi^{(1)} = (1/2)(1 + x^3),$$

$$\varphi^{(l)} = f^{(l)} p^{(l)} - f^{(l-2)} p^{(l-2)}, \quad f^{(l)} = \sqrt{(4l^2 - 1)^{-1}} - \text{поліноми Лагранжа.}$$

Згідно до моментної схеми скінченних елементів [1] величини напружень і деформацій подаються у вигляді розкладу в ряд Маклорена:

$$\sigma^{\alpha\alpha} = \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha\alpha} + \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha\alpha}_{(3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \sigma^{12} = \overset{\circ}{\sigma}^{12},$$

$$\sigma^{\alpha\alpha} = \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha\alpha}_{33} + \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha\alpha}_{(3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \sigma^{33} = \overset{\circ}{\sigma}^{33} + \overset{\circ}{\sigma}^{33}_{(3-\alpha)} x^{\alpha},$$

де $\overset{\circ}{\sigma}^{ij}$ та $\overset{\circ}{\sigma}^{ij}_{\alpha}$ - коефіцієнти розкладення напружень,

$$\varepsilon_{\alpha\alpha} = \overset{\circ}{\varepsilon}_{\alpha\alpha} + \overset{\circ}{\varepsilon}_{\alpha 3, (3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \varepsilon_{12} = \overset{\circ}{\varepsilon}_{12}$$

$$\varepsilon_{\alpha 3} = \overset{\circ}{\varepsilon}_{\alpha 3} + \overset{\circ}{\varepsilon}_{\alpha 3, (3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \varepsilon_{\alpha\alpha} = \overset{\circ}{\varepsilon}_{33} + \overset{\circ}{\varepsilon}_{33, \beta} x^{\beta},$$

$$\text{де } \overset{\circ}{\varepsilon}_{ij} = \varepsilon_{ij}|_{x^{\alpha}=0}, \quad \varepsilon_{ij, \beta} = \left. \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x^{\beta}} \right|_{x^{\beta}=0}.$$

Коефіцієнти розкладання прирощення напружень, пов'язані з коефіцієнтами розкладання прирощень деформацій законом Гука, векторна форма якого має вигляд [1]:

$$\left\{ \overset{\circ}{\sigma} \right\} = \left[\overset{\circ}{D} \right] \left\{ \overset{\circ}{\varepsilon} \right\}, \quad \left[\overset{\circ}{D} \right] = \left[\overset{\circ}{C}_{ijkl} \right],$$

де

$$\left[\overset{\circ}{D}_{,\alpha} \right] = \left[\left[C^{ij(3-\alpha)(3-\alpha)} \right] \left[C^{ij33} \right] \left[C^{ij(3-\alpha)} \right] \right].$$

Вирази матриці жорсткості і вектора вузлових реакцій отримані виходячи з варіаційного принципу Лагранжа:

$$\sum_{n=1}^N (\delta W_n - \delta A_n) = 0.$$

З урахуванням вище наведених формул взаємозв'язку коефіцієнтів розкладання прирощень напружень і деформацій та після виконання інтегрування в межах поперечного перерізу СЕ [1] вираз варіації енергії одного СЕ набуває вигляду:

$$\delta W = \int_{x^3=-1}^{x^3=1} \left\{ \delta \left\{ \overset{\circ}{\epsilon} \right\}^T [D] \left\{ \overset{\circ}{\epsilon} \right\} + \frac{1}{12} \sum_{\alpha=1}^2 \left(\delta \left\{ \overset{\circ}{\epsilon}_{,\alpha} \right\}^T \left[\overset{\circ}{D}_{,\alpha} \right] \left\{ \overset{\circ}{\epsilon}_{,\alpha} \right\} \right) \right\} \sqrt{g} dx^3.$$

Кінцеві вирази вектора амплітудних вузлових реакцій $\left\{ \overset{\circ}{R}_l \right\}$ і матриці жорсткості $[K]$ неоднорідного призматичного СЕ поперечного перерізу мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \left\{ \overset{\circ}{R}_l \right\} &= \left\{ \left[\overset{\circ}{B}_1 \right]_n^T \left\{ \sigma \right\}_l + \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n^T \left\{ \sigma \right\}_{l3} + \frac{1}{12} \sum_{m=1}^M \left(\left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n^T \left\{ \sigma \right\}_{l\alpha} + \left[\overset{\circ}{B}_{2,\alpha} \right]_n^T \left\{ \sigma \right\}_{l\alpha 3} \right) \right\} \sqrt{g}, \\ [K]_{ln\pi} &= \left\{ \left[\overset{\circ}{B}_1 \right]_n^T [D]_{00}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_1 \right]_n + \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n^T [D]_{30}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_1 \right]_n + \left[\overset{\circ}{B}_1 \right]_n^T [D]_{03}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n + \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n^T [D]_{33}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n + \right. \\ &+ \left[\overset{\circ}{B}_1 \right]_n^T [D]_{03}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n + \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n^T [D]_{33}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_2 \right]_n + \frac{1}{12} \sum_{\alpha=1}^2 \left(\left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n^T [D]_{00\alpha}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n + \left[\overset{\circ}{B}_{2,\alpha} \right]_n^T [D]_{30\alpha}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n + \right. \\ &+ \frac{1}{12} \sum_{\alpha=1}^2 \left(\left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n^T [D]_{00\alpha}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n + \left[\overset{\circ}{B}_{2,\alpha} \right]_n^T [D]_{30\alpha}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n + \right. \\ &\left. \left. \left. \left[\overset{\circ}{B}_{1,\alpha} \right]_n^T [D]_{03\alpha}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_{2,\alpha} \right]_n + \left[\overset{\circ}{B}_{2,\alpha} \right]_n^T [D]_{33\alpha}^{\text{ln}} \left[\overset{\circ}{B}_{2,\alpha} \right]_n \right) \right) \right\} \sqrt{g}. \end{aligned}$$

2. Постановка задачі

Було розглянуто болтове з'єднання двох пластин однакового розміру товщиною 5 мм двома болтами М8. Розміри пластин (Пл-1, Пл-2) становлять 0.14 х 0.065 м (висота). Загальний вигляд з'єднання показаний на рис. 2. Було розглянуто декілька схем з різними відстанями між центрами болтів, а саме: 27 мм, 37 мм та 47 мм.

З'єднання завантажене рівномірно розподіленим розтягуючим навантаженням, таким чином

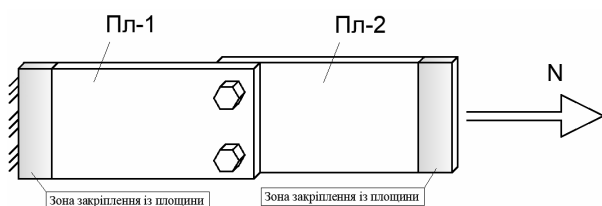


Рис. 2

напружений стан пластин відповідає рівномірному розтягу. Зусилля розтягу, що передає з'єднання, становить $N=30$ кН. Матеріал пластин – сталь, модуль пружності $E=2.06 \times 10^5$ МПа та коефіцієнт Пуассона $\nu=0,3$.

Розрахунок на основі МСЕ було виконано з використанням універсальних просторових восьмивузлових ізопараметричних СЕ. В якості програмного було використано ПК Ліра САПР [6]. Розрахункова схема наведена на рис. 2. Модуль пружності елементів, що потрапляють між тілом болта та пластинами, за виключенням площадки контакту [4], приймався рівним нулю ($E=0$), що відображено на рис. 4.

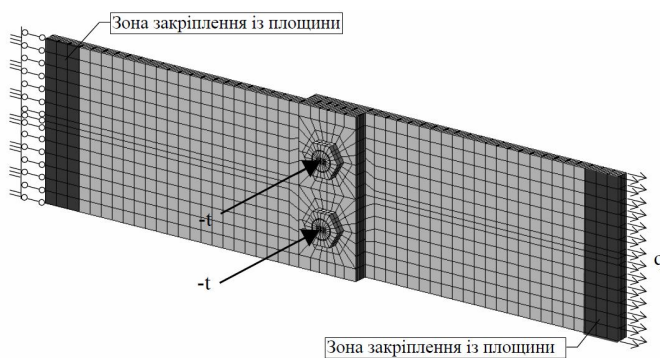


Рис. 3

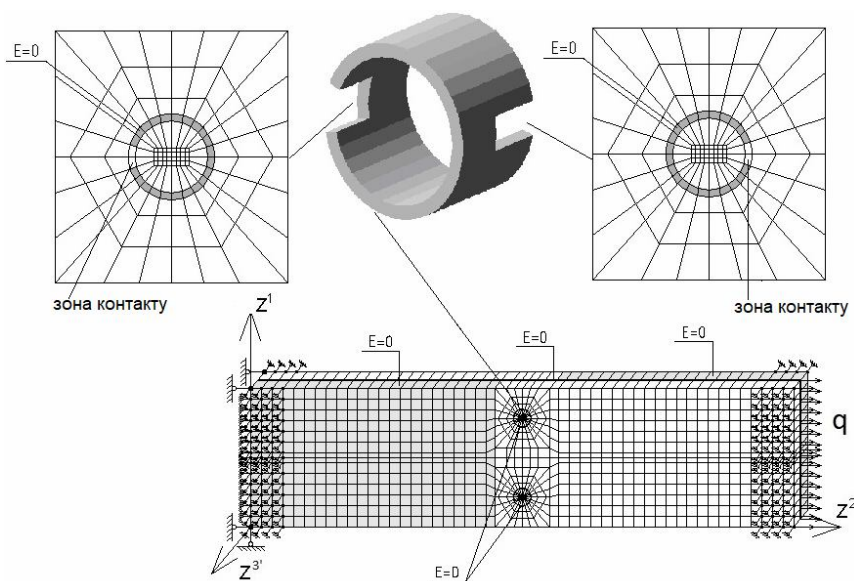


Рис. 4

При створенні розрахункової схеми НМСЕ зазор між болтом та тілом пластин також моделювався прирівнюванням до нуля модуля пружності. Так само для моделювання розділення пластин був введений фіктивний шар матеріалу з $E=0$, див. рис. 3 [3, 4]. Між пластинами було враховано сили тертя, які мають зворотній напрямок прикладеному навантаженню. Також при аналізі напружень в зонах контактів болтів з пластинами було враховано контактні напруження через коефіцієнт концентрації напружень [3, 9].

Для подальших розрахунків із визначення просторового напруженого стану використана розрахункова схема показана на рис. 3 та рис. 4, яка передбачає завантаження торця пластини Пл-2 (рис. 2) рівномірно розподіленим навантаженням вздовж напрямку дії сили і закріплення торця пластини 1 Пл-1 від переміщень в цьому ж напрямку (рис. 3 та рис. 4). Для моделювання зазор між тілом болта та пластинами у СЕ, які потрапляють в область зазору модуль пружності прирівнювався до нуля ($E=0$) рис. 4 [4, 5]. Додатково на краях пластин накладено закріплення із площини пластин.

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 болтів може призвести до того, що деякі болти будуть ослаблені, а інші перевантажені [10].

Натяг болта моделювався навантаженням від рівномірного нагрівання, значення навантаження прийнято рівним зусиллю, яке спричинить абсолютне видовження болта, обчисленого за величиною температурної деформації ϵ_T

$$\epsilon_T = \alpha \times \Delta T,$$

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:

$$\sigma = E \times \epsilon_T,$$

$$P = \sigma \times A,$$

де $A = 0.00005 \text{ м}^2$ – площа поперечного перерізу болта; P – зусилля натягу болтів, що відповідає $B_0 = 0.9 R_{bh} \times A_{bn} = 0.9 \times 560 \times 36.6 = 18.4 \text{ кН}$, де, згідно ДБН В.2.6-198_2014, [4]:

- $R_{bh} = 0.7 \times R_{bn} = 0.7 \times 800 = 560 \text{ Н/мм}^2$ – розрахунковий опір розтягу болта;
- $A_{bn} = 36 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу болта за різьбою.

Відповідно

$$\Delta T = \frac{P}{E \times \alpha \times A} = \frac{18.4}{2.06 \times 10^6 \times 0.000012 \times 0.00005} = 149^\circ\text{C}.$$

При створенні розрахункової схеми на основі НМСЕ використовувався неоднорідний призматичний скінченний елемент.

3. Результати розрахунку і їх аналіз

Аналізу підлягають еквівалентні напруження в з'єднанні, отримані розрахунком на основі НМСЕ для відстані між болтами 27 мм, 37 мм та 47 мм що складають 362 МПа, 349 МПа та 295 МПа відповідно.

Згідно з результатами отриманими розрахунком на основі МСЕ для відстані між болтами 27 мм, 37 мм та 47 мм еквівалентні напруження в з'єднанні складають 358 МПа (рис. 5), 347 МПа (рис. 6) та 296 МПа (рис. 7) відповідно.

Результати розрахунку будемо порівнювати з результатами експерименту які описані в [12]. За результатами експерименту [12] для відстані між болтами 27 мм, 37 мм та 47 мм еквівалентні напруження в з'єднанні складають 358.04 МПа, 341.07 МПа та 308.77 МПа відповідно.

Отримані на основі НМСЕ та МСЕ результати а також результати на основі експерименту наведені у вигляді графіку співставлення величин еквівалентних напружень див. рис. 8.

Значення еквівалентних напружень що виникають болтовому з'єднанні отримані на основі методу НМСЕ в порівнянні з експериментальними даними відрізняються в межах 1.1 – 4.56 %, а в порівнянні з результатами отриманими на основі МСЕ - 0.34 – 1.11 %, що свідчить про високу точність НМСЕ.

Значення еквівалентних напружень що виникають болтовому з'єднанні отримані на основі методу НМСЕ в порівнянні з експериментальними даними [12] відрізняються в межах 1.1 – 4.56 %, а в порівнянні з результатами отриманими на основі МСЕ - 0.34 – 1.11 %, що свідчить про високу точність НМСЕ.

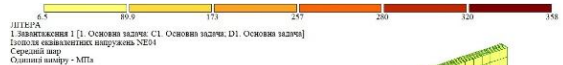


Рис. 5



Рис.6

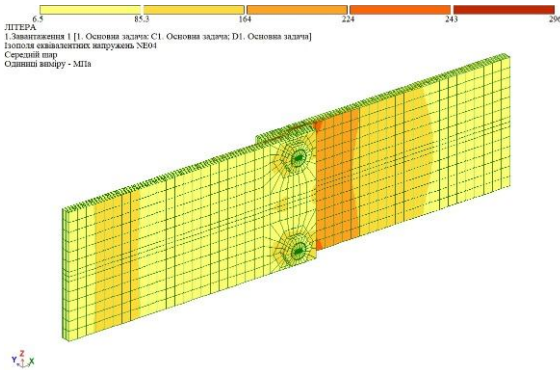


Рис. 7

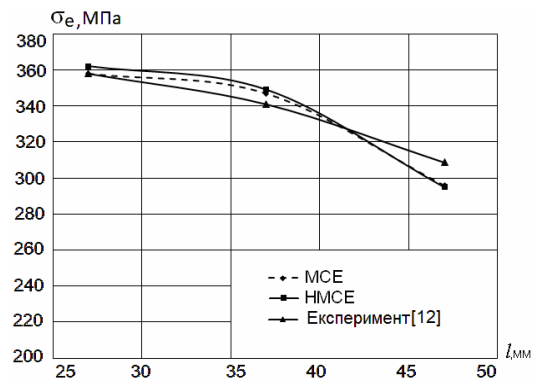


Рис. 8

Отримані результати розрахунку зведені в таблицю 1.

Отже, як можемо бачити, отримані результати розрахунку болтового з'єднання на основі НМСЕ показують досить високу збіжність результатів з розрахунком на основі МСЕ та даними отриманими на основі експерименту [12].

Таблиця 1

Крок болтів, мм	Експериментальні дані, Мпа [12]	МСЕ, МПа	НМСЕ	НМСЕ/екс [12], %	МСЕ/екс [12], %	МСЕ/ НМСЕ, %
27	358.04	358.0	362.0	1.10	-0.01	-1.11
37	341.07	347.0	349.0	2.30	1.72	-0.57
47	308.77	296.0	295.0	-4.56	-4.22	0.34

Висновок. Отримані результати розрахунку та аналізу вказують на те, що моделювання натягу болта навантаженням від рівномірного нагрівання [3, 4] МСЕ так і НМСЕ дають досить високу збіжність з розрахунком даними отриманими на основі експерименту [12].

Крім того, використання напіваналітичного методу скінченних елементів дозволяє отримати досить точні результати та розраховувати нестандартні вузли складної форми, використовуючи при цьому 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. *Вабищевич 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.
3. *Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С.* Опір матеріалів. Підручник.-2-ге вид., допов. І переробл. – К.:Вища шк., 2004. -655 с.
4. *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.
5. *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. 44-49.
6. Програмний комплекс ЛІРА-САПР. Приклади розрахунку і проектування. К.; https://www.liraland.ua/download/private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf.
7. *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.
8. *Bazhenov, V. A., Pyskunov, S.O., Maksym'yuk Yu. V., Mytsyuk S. V.* Effect of geometric nonlinearity on the life of a herringbone lock joint in creep // *Opir materialiv*, 2022, Vol. 54, No. 3, pp.372-376.
9. 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
10. Bolting theory. Function of Bolts and Nuts.// <https://www.enerpac.com/en-us/training/e/bolting-theory?srsltid=AfmBOopwGyGRyt4MitEuI1u7WnYTTinclFx4jnjmsWYgPoP5gGSBoQ3I>.
11. *Frederick F.* Ling Contact Stresses and Deformations, ME EN 7960-Precision Machine Design Topic 7, 2007.
12. *Satheesh Kumar K.V., Selvakumar P., Jagadeeswari R., Dharmaraj M., Uvanshankar K.R., Yogeswaran B.* / Stress analysis of riveted and bolted joints using analytical and experimental approach // *Materials Today: Proceedings* 42 (2021) 1091–1099.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A., Pyskunov S.O., Solodei I.I.* Chyselni doslidzhennia protsesiv neliniinoho statychnoho i dynamichnoho deformuvannya prostorovykh til (Numerical studies of the processes of nonlinear static and dynamic deformation of spatial bodies) // K.: Karavela, 2017. – 305 p.
2. *Vabishchevych M.O., Storchak D.A.* Solution of nonlinear contact problems of deformation of nodal connections of steel structures // *Opir materialiv i teorii sporud.* –K.:KNUBA, Vyp.108, 2022, P. 178-179.
3. *Pysarenko H.S., Kvitka O.L., Umanskyi E.S.* Opir materialiv. Pidruchnyk (Resistance of materials. Textbook).-2 edition., dopov. i pererobl. – K.:Vyshcha shk., 2004. -655 P.
4. *Piskunov S.O., Mitsiuk S.V., Mitsiuk D.V., Repiakh Y.* Analysis of the stress state of the bolted connection taking into account the bolt tension // *Resistance of materials and theory of structures: scientific and technical collection* - Kyiv: KNUBA, 2024. - Issue 113. - P. 44-49..
5. *Piskunov S.O., Mitsiuk S.V., Mitsiuk D.V., Repiakh Y.* STRENGTH ANALYSIS AND FORCE DISTRIBUTION IN A TENSILE METAL // *Resistance of materials and theory of structures: scientific and technical collection* - Kyiv: KNUBA, 2024. - Issue 113. - P. 44-49.
6. Prohamnyi kompleks LIRA-SAPR. Pryklady rozrakhunku i proektuvannia. K.; https://www.liraland.ua/download/private/lira/2023/lira_sapr_examples_ua.pdf.
7. *Solodei I.I., Kozub Yu.H., Stryhun R.L., Shovkivska V.V.* Chyselnyi analiz napruzhenno-deformovanoho stanu trubchastoho elementa pry termosylovomu navantazhenni (Numerical analysis of the stress-strain state of a tubular element under thermoforce loading) // *Opir materialiv i teorii sporud.* –K.:KNUBA, Vyp.109, 2022, P. 109-119.
8. *Bazhenov, V. A., Pyskunov, S.O., Maksym'yuk Yu. V., Mytsyuk S. V.* Effect of geometric nonlinearity on the life of a herringbone lock joint in creep // *Opir materialiv*, 2022, Vol. 54, No. 3, pp.372-376.
9. 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.
10. Bolting theory. Function of Bolts and Nuts.// <https://www.enerpac.com/en-us/training/e/bolting-theory?srsltid=AfmBOopwGyGRyt4MitEuI1u7WnYTTincIFx4jnjmsWYgPoP5gGSBoQ3I>.
11. *Frederick F. Ling* Contact Stresses and Deformations, ME EN 7960-Precision Machine Design Topic 7, 2007
12. *Satheesh Kumar K.V., Selvakumar P., Jagadeeswari R., Dharmaraj M., Uvanshankar K.R., Yogeswaran B.* / Stress analysis of riveted and bolted joints using analytical and experimental approach // *Materials Today: Proceedings* 42 (2021) 1091–1099.

Стаття надійшла 10.03.2025

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

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ БОЛТОВОГО З'ЄДНАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІТИЧНОГО ПІДХОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ НМСЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

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.

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 широкого кола задач при розрахунках досить часто користуються методом скінченних елементів (МСЕ), цей чисельний метод зарекомендував себе як один із найбільш розповсюджених та універсальний. При розрахунку елементів вузлів таких як болти, заклепки і т.д. використовуються, як правило, спрощені розрахункові схеми, але такий підхід не дає можливості повного аналізу розподілу зусиль. Для повного аналізу необхідно створювати детальні просторові моделі, що в свою чергу призводить до потреби в розв'язанні систем рівнянь високих порядків. Для підвищення ефективності МСЕ виникає необхідність його поєднання з методом розподілу невідомих, в результаті отриманий підхід називається напіваналітичним методом скінченних елементів (НМСЕ).

Моделювання болта, головки болта та гайки виконувалося просторовими елементами, а натяг болта моделювався навантаженням від рівномірного нагрівання.

Отримані результати напруженого деформованого стану за допомогою метода скінченних елементів та напіваналітичним методом скінченних елементів дозволяють зробити висновок про незначну різницю розподілення напружень в просторовій постановці МСЕ та НМСЕ з експериментальними даними та дозволили виявити раціональний підхід в моделюванні натягу болтів.

Ключові слова: напіваналітичний метод скінченних елементів, метод скінченних елементів, болтове з'єднання, контактні напруження, експеримент, навантаженням від рівномірного нагрівання.

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

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRESS STATE OF A BOLTED JOINT BASED ON AN ANALYTICAL APPROACH USING SFEM AND EXPERIMENTAL RESULTS

The main types of connections are welded, riveted, and bolted. Bolted connections have many advantages over other types of connections, namely: high manufacturability, reliability, and speed of installation work, so we will further consider various approaches to modeling bolted connections.

One of the most crucial and important points in the design of a structure is the calculation of the connection elements of the components, since the reliability of the structure as a whole depends on the accuracy and reliability of the calculation results.

For a wide range of tasks, the finite element method (FEM) is often used in calculations; this numerical method has proven to be one of the most common and versatile. When calculating elements of assemblies such as bolts, rivets, etc., simplified design schemes are usually used, but this approach does not allow for a complete analysis of the distribution of forces. For a complete analysis, it is necessary to create detailed spatial models, which in turn leads to the need to solve systems of high-order equations. To increase the efficiency of the FEM, it is necessary to combine it with the method of distribution of unknowns, as a result, the resulting approach is called the semi-analytical finite element method (SFEM).

The bolt, bolt head, and nut were modeled by spatial elements, and the bolt tension was modeled by a load from uniform heating.

The obtained results of the stress-strain state using the finite element method and the semi-analytical finite element method allow us to conclude that there is a slight difference in the stress distribution in the spatial formulation of the FEM and SFEM with experimental data and allowed us to identify a rational approach to modeling bolt tension.

Keywords: semi-analytical finite element method, finite element method, bolted connection, contact stresses, experiment, uniform heating load.

УДК 539.3

Пискунов С.О., Мицюк С.В., Мицюк Д.В., Реп'ях Ю.М. Порівняльний аналіз напруженого стану болтового з'єднання на основі аналітичного підходу з використанням НМСЕ та експериментальними даними // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2025. – Вип. 114. – С. 3-10. – Англ.

The paper deals with the calculation of the bolted joint of two plates using an approach to modeling the initial tension of bolts in the joint and a comparative analysis of the results with experimental results.

Табл. 1. Лл. 8. Бібліогр. 12 назв.

UDC 539.3

Pyskunov S.O., Mitsyuk S.V., Mitsyuk D.V., Repiakh Y.M. Comparative analysis of the stress state of a bolted joint based on an analytical approach using SFEM and experimental results // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2025. – Issue 114. – P. 3-10.

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. 1. Fig. 8. Bibliogr. Ref. 12.

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

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ, просп. Берестейський, 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

E-mail: s_piskunov@ua.fm

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

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

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 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 (науковий ступінь, вчене звання, посада): аспірант кафедри будівельної механіки КНУБА Мицюк Дмитро Вікторович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 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 (науковий ступінь, вчене звання, посада): аспірант кафедри будівельної механіки КНУБА Реп'ях Юрій Миколайович

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 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>