

АНОТАЦІЯ

Мицюк Д. В. Напружено-деформований стан елементів металевих конструкцій з дефектами різного походження. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія». – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2026.

Болтові з'єднання є одними з найпоширеніших і найвідповідальніших конструктивних елементів у металевих будівельних конструкціях, мостобудуванні та машинобудуванні. Надійність болтових вузлів безпосередньо визначає безпеку та довговічність усієї конструктивної системи. Практика проектування та експлуатації свідчить, що болтові з'єднання є зонами підвищеної концентрації пошкоджень, зумовленої складним напружено-деформованим станом, контактною взаємодією деталей та наявністю дефектів різного походження. Відмова або пошкодження болтових вузлів нерідко стають причиною аварійних ситуацій і втрати несучої здатності конструкцій загалом, що визначає актуальність їх детального чисельного аналізу.

Застосування спрощених розрахункових моделей не дозволяє адекватно відтворити розподіл зусиль і напружень у вузлі, особливо за наявності початкового натягу болтів та дефектів різного походження — тріщин, корозійних уражень, відхилень геометрії. Серед сучасних підходів особливу перспективність для вирішення цих задач має напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ), що поєднує переваги аналітичних методів і класичного МСЕ та забезпечує суттєве скорочення розмірності задачі при збереженні просторового характеру розподілу напружень і деформацій.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами кафедри будівельної механіки КНУБА, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію та публікації.

Перший розділ присвячено огляду підходів до розв'язання задач визначення напружено-деформованого стану болтових з'єднань металевих елементів з початковими та набутими дефектами. Розглянуто можливості використання призматичного скінченного елемента для моделювання початкових геометричних недосконалостей. Проаналізовано особливості моделювання НДС у системі контактної взаємодії в болтових з'єднаннях. Висвітлено застосування напіваналітичного методу скінченних елементів для побудови просторових розрахункових моделей болтового з'єднання та контактної взаємодії між елементами вузла.

У другому розділі представлено неоднорідний призматичний скінченний елемент, що є основою розробленого підходу. Описано геометрію та систему координат неоднорідного призматичного скінченного елемента. Розкрито застосування НМСЕ для моделювання болтових з'єднань і наведено алгоритм розрахунку болтового з'єднання при використанні НМСЕ.

Третій розділ присвячено підходам до створення розрахункової схеми та аналізу особливостей напружено-деформованого стану в системі взаємодії тіл «болт–деталі». Вперше в рамках НМСЕ розроблено та досліджено п'ять підходів до чисельного моделювання болтів та їх попереднього натягу, для кожного з яких виведено розрахункові залежності, визначено фізичний зміст і встановлено межі раціонального застосування. Підхід №1 (об'єднання переміщень у вузлах без урахування натягу) та підхід №2 (закріплення по контуру отвору з тривимірними СЕ) забезпечують оцінку просторового розподілу напружень без урахування натягу. Для з'єднань, що працюють на зріз, рекомендовано взаємозамінні підходи №3 і №5 (зосереджені та

розподілені сили попереднього натягу відповідно). Для фланцевих з'єднань при роботі болтів на розтяг рекомендовано підхід №4 із застосуванням температурного навантаження стрижня болта.

Виконано чисельне моделювання болтового з'єднання двох пластин при умовному зрізі болтів та фланцевого з'єднання кругових труб при дії згинального моменту. Верифікацію отриманих результатів проведено шляхом зіставлення з розрахунками у програмних комплексах ЛІРА САПР та Idea StatiCa, а також з експериментальними даними. У всіх розглянутих задачах НМСЕ не поступається класичному МСЕ за точністю результатів, суттєво скорочуючи розмірність задачі та час розрахунку.

У четвертому розділі досліджено вплив набутих дефектів у процесі експлуатації на НДС болта фланцевого з'єднання мосту. На прикладі фланцевого з'єднання пішохідного мосту (садибний парк Гелгаудишкіс, Литва) побудовано просторову розрахункову схему з урахуванням двох типів набутих дефектів — корозійних раковин та деформацій тіла болта. Аналіз результатів показав суттєвий вплив дефектів на розподіл напружень і несучу здатність з'єднання. Встановлено, що деформація тіла болта є найбільш критичним дефектом, що призводить до значної концентрації напружень і передчасного вичерпання ресурсу вузла. На основі чисельних розрахунків визначено граничні навантаження та розроблено рекомендації щодо технічного обслуговування та моніторингу болтових з'єднань мостових конструкцій.

В результаті проведених досліджень розроблено ефективний алгоритм чисельного аналізу напружено-деформованого стану болтових з'єднань металевих конструкцій на основі НМСЕ, що програмно реалізовано у спеціалізованому програмному забезпеченні. Алгоритм забезпечує достовірне визначення розподілу зусиль і напружень у болтах та елементах, що з'єднуються, з урахуванням початкового натягу, контактної взаємодії та просторового характеру роботи вузла. Розроблені методи дозволяють

виконувати детальне дослідження впливу початкових і набутих дефектів на НДС і несучу здатність болтового з'єднання, а отримані кількісні закономірності можуть бути безпосередньо використані для розроблення критеріїв технічного обслуговування та систем планового обстеження відповідальних вузлів металевих конструкцій.

Ключові слова: напружено-деформований стан, болтове з'єднання, металеві конструкції, напіваналітичний метод скінченних елементів, дефекти, початковий натяг болтів, контактна взаємодія, механіка руйнування, залишковий ресурс, верифікація.

SUMMARY

Mytsyuk D. V. Stress-strain state of metal structure elements with defects of various origins. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 "Construction and Civil Engineering". – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2026.

Bolted connections are among the most common and critical structural elements in metal building structures, bridge construction, and mechanical engineering. The reliability of bolted joints directly determines the safety and durability of the entire structural system. Design and operating experience shows that bolted connections are zones of increased damage concentration, caused by the complex stress-strain state, contact interaction of parts, and the presence of defects of various origins. Failure or damage of bolted joints often leads to emergency situations and loss of bearing capacity of structures, which determines the relevance of their detailed numerical analysis.

The use of simplified computational models does not adequately reproduce the distribution of forces and stresses in the joint, especially in the presence of bolt preload and defects of various origins — cracks, corrosion damage, geometry deviations. Among modern approaches, the semi-analytical finite element method (SAFEM) is particularly promising for solving these problems, combining the advantages of analytical methods and classical FEM, significantly reducing the dimensionality of the problem while preserving the spatial nature of stress and strain distribution.

The introduction substantiates the relevance of the topic, establishes the connection of the work with the scientific programs of the Department of Structural Mechanics of KNUCA, formulates the goal and objectives of the study, defines the object and subject of research, scientific novelty and practical significance of the results obtained, and provides information on approbation and publications.

The first chapter reviews approaches to solving problems of determining the stress-strain state of bolted connections of metal elements with initial and acquired defects. The possibilities of using a prismatic finite element for modeling initial geometric imperfections are considered. The features of modeling the SSS in the contact interaction system in bolted connections are analyzed. The application of the semi-analytical finite element method for constructing spatial design models of bolted connections and contact interaction between joint elements is highlighted.

The second chapter presents a heterogeneous prismatic finite element, which is the basis of the developed approach. The geometry and coordinate system of the heterogeneous prismatic finite element are described. The application of SAFEM for modeling bolted connections is disclosed and an algorithm for calculating a bolted connection using SAFEM is presented.

The third chapter is devoted to approaches to creating a design scheme and analyzing the features of the stress-strain state in the body interaction system "bolt-parts". For the first time within the SAFEM framework, five approaches to the numerical modeling of bolts and their preload were developed and investigated, for each of which design dependencies were derived, physical meaning was determined, and limits of rational application were established. Approach No. 1 (merging displacements at nodes without considering preload) and approach No. 2 (fixing displacements along the bolt hole contour with 3D finite elements) provide assessment of spatial stress distribution without considering preload. For shear connections, interchangeable approaches No. 3 and No. 5 (concentrated and distributed preload forces, respectively) are recommended. For flanged connections with bolts in tension, approach No. 4 using thermal loading of the bolt shank is recommended.

Numerical modeling of the bolted connection of two plates under conventional bolt shear and a flanged connection of circular pipes under bending moment action was performed. Verification of the obtained results was carried out by comparison with calculations in LIRA-SAPR and Idea StatiCa software

packages, as well as with experimental data. In all considered problems, SAFEM is not inferior to classical FEM in terms of result accuracy, significantly reducing the dimensionality of the problem and calculation time.

The fourth chapter investigates the influence of acquired defects during operation on the SSS of a flange joint bolt of a bridge. Using the example of a pedestrian bridge flange connection (Gelgaudiskis manor park, Lithuania), a spatial design scheme was constructed taking into account two types of acquired defects — corrosion cavities and bolt body deformations. Analysis of the results showed a significant influence of defects on the stress distribution and bearing capacity of the connection. Bolt body deformation was found to be the most critical defect, leading to significant stress concentration and premature exhaustion of the joint resource. Based on numerical calculations, limit loads were determined and recommendations for maintenance and monitoring of bridge bolted connections were developed.

As a result of the research, an effective algorithm for numerical analysis of the stress-strain state of bolted connections of metal structures based on SAFEM was developed and implemented in specialized software. The algorithm provides reliable determination of the distribution of forces and stresses in bolts and connected elements, taking into account preload, contact interaction, and the spatial nature of the joint operation. The developed methods allow detailed investigation of the influence of initial and acquired defects on the SSS and bearing capacity of the bolted connection, and the obtained quantitative patterns can be directly used for developing maintenance criteria and scheduled inspection systems for critical metal structure joints.

Keywords: stress-strain state, bolted connection, metal structures, semi-analytical finite element method, defects, bolt preload, contact interaction, fracture mechanics, residual life, verification.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

а) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (в т.ч. включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «А»):

1. 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. 120-128. (Наукове фахове видання України, категорія «А») DOI:10.32347/2410-2547.2022.109.120-128 <http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/271553>
Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні рамного вузла з використанням програмного комплексу IDEA StatiCa та порівняльний аналіз цих результатів із отриманими на основі вимог нормативних документів ДБН та EN.
2. 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. (Наукове фахове видання України, категорія «А») DOI:10.32347/2410-2547.2024.112.36-42
<http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/304984>
Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні вузла болтового з'єднання двох пластин та порівняльний аналіз результатів розрахунку на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ), та МСЕ в плоскій постановці і в просторовій постановках.
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. (Наукове фахове видання України, категорія «А») DOI:10.32347/2410-2547.2024.113.37-44
<http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/316752>
Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні вузла болтового з'єднання при використанні різних підходів до моделювання

початкового натягу болтів у з'єднанні та порівняльний аналіз результатів.

4. 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. (Наукове фахове видання України, категорія «А») DOI:10.32347/2410-2547.2025.114.3-10

<http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/328799>

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні вузла болтового з'єднання двох пластин при використанні підходу до моделювання початкового натягу болтів у з'єднанні та порівняльний аналіз результатів із експериментальними даними.

5. Mitsyuk S.V., **Mitsyuk D.V.** Analysis of the Stress–Strain State of a Flanged Connection Based on an Analytical Approach Using the Finite Element Method and Comparison with Experimental Data // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – К.: KNUBA. 2025. – Issue 115. – P. 157-163. (Наукове фахове видання України, категорія «А») DOI:10.32347/2410-2547.2025.115.157-163

<http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/345349>

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні фланцевого вузла болтового з'єднання на основі МСЕ в просторовій постановці та з використанням універсальних просторових восьмивузлових ізопараметричних СЕ.

б) статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»:

6. Мицюк С.В., Андрієвський В.П., Мицюк Д.В., Реп'ях Ю.М. «Верифікація результатів розрахунку болтового з'єднання нмсе із застосуванням програмного засобу IDEA StatiCaconnection»// К.: AppliedMechanics, Constructionand Civil Engineering2025. – №80-16. – С.160-167 (Наукове фахове видання України, категорія «Б»)

DOI:10.33271/crpnmu/80.160 <https://znp.nmu.org.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/70-80ua/1143-80ua16>

Особистий внесок здобувача 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.

в) статті у наукових виданнях іноземних держав:

7. Мицюк, С., **Мицюк, Д.**, & Максим'юк, Ю. (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF FLANGE CONNECTION CALCULATION USING THE FEM AND CFEM METHODS. Modern Engineering and Innovative Technologies, 2(40-02), 88–96. (Іноземне наукове фахове видання, категорія «Б») DOI:10.30890/2567-5273.2025-40-02-057 <https://moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit40-02-057/9302>

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні фланцевого вузла болтового з'єднання круглих труб з використанням програмних комплексів ПК Ліра Сапр та IDEA StatiCa.

8. Мицюк, С., & **Мицюк, Д.** (2025). COMPREHENSIVE STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS OF A FLANGE JOINT BASED ON AN ANALYTICAL APPROACH AND NUMERICAL MODELING WITH EXPERIMENTAL COMPARISON. Modern Engineering and Innovative Technologies, 2(41-02), 82–93. (Іноземне наукове фахове видання, категорія «Б») DOI:10.30890/2567-5273.2025-41-02-014 <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit41-02-014/9560>

Особистий внесок здобувача полягає у дослідженні фланцевого вузла болтового з'єднання з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) у просторовій постановці задачі.

9. Мицюк, С., & **Мицюк, Д.** (2025). COMPARISON OF SEMI-ANALYTICAL FINITE ELEMENT (SFEM) NUMERICAL SIMULATION RESULTS FOR A FLANGE JOINT WITH EXPERIMENTAL DATA. Modern Engineering and Innovative Technologies, 2(42-02), 100–108. (Іноземне наукове фахове видання, категорія «Б») DOI:10.30890/2567-5273.2025-42-02-011 <https://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/meit42-02-011/9815>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Дослідження та порівняльний аналіз елементів вузла із застосуванням програмного комплексу та ручного розрахунку / The X International Scientific and Practical Conference "Global achievements and current trends in the development of science", March 11–13, 2024, Sofia, Bulgaria.
11. Екстраполяція параметрів напружено-деформованого стану при розв'язанні систем рівнянь НМСЕ в задачах визначення довговічності в просторових тілах / Міжнародна мультидисциплінарна наукова інтернет-конференція «Світ наукових досліджень. Випуск 28», м. Тернопіль, Україна – м. Ополе, Польща, 21–22 березня 2024 р.
12. Розв'язання задач континуального руйнування тіл обертання при багатоциклового навантаженні / The 7th International scientific and practical conference "Current challenges of science and education" (March 11–13, 2024). MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2024. P. 129–131.
13. Розв'язання задач континуального руйнування тіл обертання при багатоциклового навантаженні / XVII International scientific and practical conference «The latest technologies of science implemented in use», April 28–30, 2025, Munich, Germany. P. 238–239.
14. Verification of bolted connection calculation results with various approaches to bolt and tension modelling using Idea StatiCa software / X Міжнародна науково-практична конференція «European Congress of Scientific Discovery», 15–17.09.2025, Madrid, Spain.