

Голові разової спеціалізованої ради PhD 65.192  
Київського національного університету  
будівництва і архітектури  
доктору технічних наук, професору  
Солодею Івану Івановичу

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук,  
професора, завідувача кафедри міського будівництва та господарства  
Національного університету водного господарства та природокористування  
**Кочкарьова Дмитра Вікторовича**  
на дисертаційну роботу Мицюка Дмитра Вікторовича на тему «**Напружено-деформований стан елементів металевих конструкцій з дефектами різного походження**» представлену на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія галузі знань 19 Архітектура та будівництво

### **1. Обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи**

Забезпечення надійності, довговічності та безпечної експлуатації будівельних і машинобудівних конструкцій є одним із пріоритетних напрямів сучасної інженерної науки. Значна кількість аварій, пошкоджень і відмов конструкцій пов'язана не з втратою несучої здатності основних елементів, а з руйнуванням або пошкодженням вузлових з'єднань, які є найбільш відповідальними ділянками конструктивної системи. Саме тому дослідження напружено-деформованого стану з'єднань, встановлення закономірностей їх деформування та оцінювання залишкової довговічності є важливими науковими та практичними завданнями.

Серед різноманітних способів з'єднання конструктивних елементів особливе місце займають болтові з'єднання, які набули широкого застосування в будівництві, машинобудуванні, мостобудуванні, енергетиці та виробництві технологічного устаткування. Їх широке використання

зумовлене високою технологічністю виготовлення та монтажу, можливістю багаторазового складання і розбирання, відсутністю залишкових термічних напружень, характерних для зварних з'єднань, а також високою експлуатаційною надійністю.

Практика проектування свідчить, що при розрахунку конструкцій вузлові з'єднання часто задаються спрощено, а їх несуча здатність визначається за нормативними методиками, які базуються на використанні узагальнених коефіцієнтів та спрощених розрахункових схем. Такий підхід не дозволяє отримати детальну картину розподілу напружень і деформацій у з'єднанні, оцінити локальні концентрації напружень та встановити дійсні механізми втрати несучої здатності. Унаслідок цього можуть виникати як надмірні запаси міцності, що призводять до перевитрати матеріалів, так і небезпечні ситуації, пов'язані з недооцінкою напруженого стану окремих елементів вузла.

Особливої актуальності набуває проблема врахування попереднього натягу високоміцних болтів, який суттєво впливає на розподіл внутрішніх зусиль і змінює характер роботи з'єднання. Крім того, під час експлуатації конструкцій у болтових вузлах можуть виникати різноманітні дефекти. Наявність таких дефектів значно ускладнює оцінювання технічного стану вузлів та потребує застосування методів, здатних забезпечити достовірне прогнозування їх залишкової довговічності та ресурсу. Перспективним напрямом вирішення зазначених проблем є застосування напіваналітичного методу скінченних елементів, який поєднує переваги аналітичних підходів та класичного методу скінчених елементів. Використання напіваналітичного методу скінченних елементів дає змогу суттєво зменшити розмірність задачі, скоротити обчислювальні витрати та забезпечити високу точність визначення параметрів напружено деформованого стану. Що й підтверджує актуальність проведених досліджень.

## **2. Обґрунтування зв'язку із науковими програмами, планами й темами**

Дисертаційна робота виконана у відповідності до загального плану наукових досліджень кафедри будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) за темами: «Теорія і методи дослідження неізотермічного фізично нелінійного деформування просторових тіл обертання з урахуванням динамічного навантаження» (0122U001709) (01.01.2022-31.12.2024 виконавець). «Розробка математичних моделей та методів дослідження процесів розповсюдження інтенсивних та вибухових динамічних навантажень в межах суцільних середовищ» (0125U001871) (01.01.2025-31.12.2027 виконавець). Автор брав безпосередню участь у виконанні цих науково-дослідних робіт як виконавець.

## **3. Обґрунтованість наукових результатів, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність**

Достовірність основних наукових положень та отриманих у дисертації результатів підтверджується використанням фундаментальних положень механіки деформівного твердого тіла, теорії пружності та методу скінчених елементів, збіжністю чисельних розв'язків при згущенні сітки скінчених елементів та збільшенні кількості гармонік апроксимації в напів аналітичному методі скінчених елементів, розв'язанням тестових задач, для яких існують аналітичні, чисельні або експериментальні рішення, зіставленням результатів, отриманих за розробленим алгоритмом напів аналітичного методу скінчених елементів, з результатами тривимірного моделювання методом скінчених елементів у програмному комплексі ЛПРА-САПР та компонентного методу, реалізованого у програмному комплексі Idea StatiCa. Також достовірність та обґрунтованість отриманих результатів підтверджена задовільною відповідністю результатів чисельного моделювання експериментальним даним, наведеним у літературних

джерелах, а також відсутністю суперечностей між результатами, отриманими різними незалежними методами дослідження.

#### **4. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру**

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше розроблено алгоритм чисельного аналізу болтових з'єднань металевих конструкцій на основі напіваналітичного методу скінченних елементів, який забезпечує одночасне врахування просторової роботи вузла, контактної взаємодії елементів та попереднього натягу болтів, що дало можливість визначати параметри напружено-деформованого стану з підвищеною достовірністю.
- вперше встановлено кількісні закономірності впливу початкових та експлуатаційних дефектів елементів болтових з'єднань на перерозподіл зусиль, несучу здатність та залишковий ресурс вузлів металевих конструкцій.
- удосконалено методику чисельного моделювання болтових з'єднань шляхом розроблення варіантів моделювання болтів та їх попереднього натягу, що дозволило визначити межі їх раціонального застосування залежно від необхідної точності та обчислювальних витрат.
- набули подальшого розвитку методи прогнозування технічного стану та залишкової довговічності болтових з'єднань металевих конструкцій на основі поєднання результатів напіваналітичного методу скінченних елементів з підходами механіки руйнування.

#### **5. Практичне значення результатів досліджень**

Практичне значення результатів роботи полягає у створенні та програмній реалізації ефективного алгоритму чисельного аналізу напружено-деформованого стану (НДС) болтових з'єднань металевих конструкцій на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ), що

забезпечує достовірне визначення розподілу зусиль і напружень у болтах та елементах, що з'єднуються.

Розроблені методи дозволяють виконувати детальне дослідження впливу початкових і набутих у процесі експлуатації дефектів на НДС і несучу здатність болтового з'єднання. Отримані кількісні закономірності можуть бути безпосередньо використані для розроблення критеріїв технічного обслуговування та систем планового обстеження відповідальних вузлів металевих конструкцій.

## **6. Оцінка змісту та завершеності дисертаційної роботи**

Дисертація складається із анотації, списку публікацій, вступу, чотирьох розділів із висновками, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 125 сторінки: основна частина – 109 сторінок, 54 рисунки, 13 таблиці, перелік використаних джерел із 81 найменувань на 9 сторінках, 2 додатків на 4 сторінках. Дисертаційна робота написана українською мовою з використанням технічно грамотної сучасної наукової термінології. Викладення матеріалу дисертації є логічним, а також відповідає вимогам до наукових праць.

У **першому** розділі виконано аналіз сучасного стану досліджень у галузі чисельного моделювання напружено-деформованого стану болтових з'єднань металевих конструкцій. Розглянуто підходи до моделювання початкових геометричних недосконалостей, контактної взаємодії в системі «болт–деталі» та застосування напіваналітичного методу скінченних елементів для побудови просторових розрахункових моделей болтових вузлів. За результатами аналізу визначено невирішені питання та обґрунтовано напрями подальших досліджень.

У **другому** розділі розроблено теоретичні основи неоднорідного призматичного скінченного елемента в рамках напіваналітичного методу скінченних елементів. Наведено геометричні співвідношення, апроксимаційні залежності, отримано матрицю жорсткості та вектор

вузлових реакцій на основі варіаційного принципу Лагранжа. Розроблений скінченний елемент є основою для побудови ефективних розрахункових моделей болтових з'єднань.

У **третьому** розділі розроблено алгоритми побудови розрахункових моделей болтових з'єднань на основі НМСЕ з урахуванням контактної взаємодії, попереднього натягу болтів та просторового характеру роботи вузла. Запропоновано різні підходи до моделювання болтів і їх попереднього натягу та виконано дослідження особливостей формування напружено-деформованого стану з'єднань. Проведено верифікацію розроблених алгоритмів шляхом порівняння з результатами класичного МСЕ та інших програмних комплексів.

**Четвертий** розділ присвячено дослідженню впливу початкових і набутих дефектів на напружено-деформований стан, несучу здатність та залишкову довговічність болтових з'єднань металевих конструкцій. Встановлено кількісні закономірності перерозподілу напружень залежно від виду та параметрів дефектів, а також розроблено практичні рекомендації щодо оцінювання технічного стану, прогнозування ресурсу та організації технічного обслуговування відповідальних вузлів конструкцій..

## **7. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях**

Наукові результати дисертації відображено в 14 наукових працях, у тому числі: 5 статей в науковому фаховому виданні України категорії «А», проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus; 1 стаття у науковому виданні України категорії «Б»; 3 статті у науковому виданні іншої держави; 5 – тез наукових доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Опубліковані наукові праці Мицюка Д.В., які зараховані за темою дисертації, відповідають вимогам «Порядку про присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора

філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022 року.

## **8. Дотримання вимог академічної доброчесності**

За результатами перевірки дисертаційної роботи Мицюка Д.В., на наявність ознак академічного плагіату встановлено коректність всіх посилань на першоджерела для текстових та ілюстрованих запозичень. Навмисних спотворень не виявлено. Порушення академічної доброчесності відсутні.

## **9. Дискусійні положення та зауваження до дисертації**

1. У роботі підтверджено достовірність розробленого алгоритму шляхом порівняння результатів із класичним методом скінчених елементів, компонентним методом та експериментальними даними. Разом з тим доцільно було б навести кількісну оцінку обчислювальної ефективності запропонованого підходу (час розрахунку, кількість ступенів вільності, витрати оперативної пам'яті) порівняно з повністю просторовими тривимірними моделями методу скінчених елементів.

2. У дисертації досліджено переважно пружне деформування болтових з'єднань. Перспективним напрямом подальших досліджень є поширення розробленого алгоритму на фізично нелінійні задачі, зокрема на пружно-пластичне деформування матеріалів та контактну пластичність у зонах концентрації напружень.

3. Під час аналізу контактних напружень у зоні взаємодії болта з отвором пластини використано класичну теорію Герца. Доцільно більш детально обґрунтувати межі її застосування для будівельних болтових з'єднань, оскільки за високих рівнів навантаження можливий розвиток локальних пластичних деформацій та змінання матеріалу, що виходить за межі припущень теорії Герца.

4. У роботі наведено результати збіжності за кількістю скінчених елементів і гармонік апроксимації. Разом з тим доцільно було б сформулювати практичні рекомендації щодо вибору мінімально необхідної

кількості гармонік залежно від типу навантаження, геометрії вузла та необхідної точності розрахунку.

5. Розроблений алгоритм орієнтований на дослідження болтових з'єднань із наявністю окремих початкових та набутих дефектів. Водночас становить інтерес дослідження сумісного впливу декількох дефектів та їх напружено-деформованого стану у процесі експлуатації в задачах прогнозування довговічності конструкцій.

6. У роботі розглянуто різні підходи до моделювання болтів та їх попереднього натягу. Разом з тим бажано було б навести оцінку чутливості напружено-деформованого стану до можливих відхилень величини попереднього натягу, які можуть виникати внаслідок технологічних похибок монтажу та експлуатаційного послаблення болтових з'єднань.

7. У дисертації значну увагу приділено дослідженню напружено-деформованого стану болтових з'єднань, однак межі застосування розробленого алгоритму для складних багато болтових вузлів при комбінованому навантаженні (розтяг, згин, поперечна сила) висвітлено недостатньо повно, що може бути предметом подальших досліджень.

Зазначені зауваження не знижують наукову та практичну цінність дисертаційної роботи, а підтверджують її актуальність та новизну.

## **10. Загальний висновок**

Дисертаційна робота Мицюка Дмитра Вікторовича на тему «Напружено-деформований стан елементів металевих конструкцій з дефектами різного походження» є самостійною, завершеною науковою працею, у якій розв'язано актуальну науково-технічну задачу підвищення достовірності та ефективності чисельного аналізу напружено-деформованого стану і прогнозування залишкового ресурсу болтових з'єднань металевих конструкцій шляхом розвитку напіваналітичного методу скінченних елементів для моделювання просторової роботи вузлів, контактної взаємодії та попереднього натягу болтів.

Дисертаційна робота Мицюка Дмитра Вікторовича на тему «Напружено-деформований стан елементів металевих конструкцій з дефектами різного походження», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – будівництво та цивільна інженерія, відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р., а її автор Мицюк Дмитро Вікторович заслуговує присудження наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Офіційний опонент, доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри міського будівництва та господарства  
Національного університету  
водного господарства та  
природокористування

Дмитро КОЧКАРЬОВ



Олександр БАНІС