

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу *Терьохіна Богдана Ігоровича*
на тему: «*Концентрація напружень навколо отворів тонких пластин
і циліндричних оболонок із функціонально-градієнтних матеріалів*»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
зі спеціальності 113 Прикладна математика

Дисертаційна робота Терьохіна Б. І. присвячена розв'язанню низки питань стосовно особливостей напружено-деформівного стану тонких пластин і циліндричних оболонок з отворами та включеннями із функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ). **Актуальність обраної** теми дисертації обумовлена широким практичним застосуванням пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами в різних галузях техніки, а також застосуванням інноваційних ФГМ в тонкостінних конструкціях з отворами з метою зменшення концентрації напружень поблизу отворів.

Основна **мета** дисертаційної роботи полягає у встановленні раціональних механічних і геометричних параметрів радіально-неоднорідних включень навколо отворів у тонких пластинах і циліндричних оболонках, що надає змогу зменшити величину коефіцієнта концентрації напружень (ККН).

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літературних джерел та двох додатків.

У **вступі** проведено опис актуальності, мети та завдань, поставлених в роботі, її новизни та практичного значення.

Перший розділ присвячено огляду праць з визначення напружено-деформованого стану (НДС) пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами та включеннями. Проаналізовано основні способи зниження концентрації напружень, яка виникає поблизу отворів, та вплив неоднорідних матеріалів на НДС тонкостінних конструкцій з концентраторами напружень. Виконано аналіз літературних джерел стосовно тематики дисертації і

відзначено, що при дослідженні НДС конструкцій з різними неоднорідностями доцільно використовувати числові методи механіки.

У **другому розділі** наведено основні теоретичні відомості і співвідношення з теорії пластин і оболонок, які використовуються при побудові математичних моделей. Представлені основні рівняння НДС тонких радіально-неоднорідних пластин та наведено алгоритм розв'язання крайової задачі для них в аналітичному вигляді. Розглянуто основні положення методу скінченних елементів та особливості його застосування для аналізу НДС тонких неоднорідних пластин і циліндричних оболонок. Для математичного формулювання розглянутих задач автор використовує варіаційну постановку. Наведено функціонали повної потенціальної енергії деформації систем у випадку пластин та оболонок. Запропоновано математичні моделі варіаційних задач для випадку використання функціонально-градієнтних матеріалів.

У **третьому розділі** дисертації запропоновано методику і обчислювальний алгоритм числового моделювання процесів пружного деформування тонких пластин з отворами і включеннями із функціонально-градієнтних матеріалів. За допомогою цієї методики здійснено комп'ютерне моделювання і числовий МСЕ-аналіз поведінки тонкої пружної прямокутної пластини з круговим отвором і радіально-неоднорідним кільцевим включенням. Досліджено вплив геометричних і механічних параметрів включення на концентрацію напружень навколо отвору за різних законів зміни модуля пружності функціонально-градієнтного матеріалу. Проведено порівняльний аналіз результатів для пластин з включеннями із функціонально-градієнтного матеріалу та з однорідними включеннями. Встановлено, що за наявності включень із певними механічними властивостями стає можливим впливати не лише на величину ККН у пластині поблизу локальних концентраторів напружень, але й на розподіл напружень по ширині включення. Знайдені раціональні параметри включень в пластині, які дають змогу отримати механічний ефект в околі концентратора напружень: зменшити і напруження, і деформації.

Верифікацію одержаних результатів проведено для окремих випадків з відомими аналітичними розв'язками.

У **четвертому розділі** на основі запропонованої числової методики здійснено комп'ютерне моделювання та скінченноелементний аналіз НДС тонкостінних циліндричних оболонок, ослаблених круговим отвором за наявності оточуючого його радіально-неоднорідного кільцевого включення. Досліджено вплив розмірів ФГМ-включення та закону зміни його модуля пружності на концентрацію параметрів НДС оболонок в околі отвору. Отримано розподіл інтенсивностей напружень і деформацій в зонах локальної концентрації напружень. Здійснено порівняльний аналіз одержаних результатів для циліндричних оболонок із відповідними даними для пластин. Встановлено, що за використання радіально-неоднорідного включення із функціонально-градієнтного матеріалу з певними механічними властивостями і геометричними характеристиками можна впливати на величину ККН в пластині й оболонці як з круговим, так і з прямокутним отворами.

Знайдено раціональні параметри включень (їх ширину і закон зміни модуля пружності), які дають змогу зменшити коефіцієнт концентрації напружень в пластині й оболонці на приблизно 56%. При цьому автором роботи виявлено новий механічний ефект в околі концентратора напружень при застосуванні ФГМ-включень: спостерігається зменшення величини інтенсивності як напружень, так і деформацій.

У **висновках** викладені основні результати роботи. Висновки сформульовано чітко і логічно, вони повністю відповідають змісту роботи.

Список літературних джерел, з моєї точки зору, досить повно відображає стан справ по тематиці дисертаційної роботи.

У **додатках** наведено список публікацій автора за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації, а також копію Довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи.

Отримані результати дослідження мають **наукову новизну**. У роботі

запропоновано нові розрахункові моделі варіаційних задач визначення НДС структурно неоднорідних тіл з отворами і радіально-неоднорідними включеннями з урахуванням властивостей ФГМ;

Розроблено методику і обчислювальні алгоритми числового моделювання процесів пружного деформування пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами і ФГМ-включеннями;

Вперше розв'язано задачу визначення НДС пластин і циліндричних оболонок з круговим (квадратним) отвором і радіально-неоднорідними включеннями навколо нього з нових модельних матеріалів;

Побудовано і досліджено розвиток і трансформацію зон перерозподілу інтенсивності напружень в залежності від параметрів ФГМ-включень. Вивчено вплив розмірів, жорсткості та закону зміни модуля пружності радіально-неоднорідних кільцевих включень на деформаційні процеси в матеріалі в околі концентраторів напружень;

Отримано раціональні параметри і виявлено нові механічні ефекти на основі проведеного числового і комп'ютерного моделювання поведінки пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з круговими отворами і кільцевими ФГМ-включеннями з різними механічними і геометричними параметрами (різні закони зміни модуля пружності включень, жорсткості та варіанти їх розмірів) при їх пружному деформуванні.

Отримані у дисертаційній роботі розв'язки мають як **теоретичне**, так і **практичне значення**, оскільки вони можуть служити науково-методичною основою для перспективних розробок в механіці деформівного твердого тіла, надають змогу проводити дослідження актуальних задач механіки, які виникають в інженерній практиці при розрахунках міцності неоднорідних конструкцій з різноманітними концентраторами напружень. Одержані результати розв'язаних задач для пластинчато-оболонкових елементів конструкцій можуть безпосередньо використовуватися при прогнозуванні безпечної роботи відповідних конструкцій в машинобудуванні, енергетиці, будівництві, аерокосмічній техніці тощо.

Дисертаційна робота виконувалась у 2020–2024 рр. у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження за темою дисертації здійснювалися також в проблемній науково-дослідній лабораторії міцності і надійності конструкцій кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки механіко-математичного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в рамках держбюджетних тем 1-645-19 «Оптимізація та дослідження поведінки неоднорідних структур з урахуванням появи мікродефектів, тріщиноутворень та отворів», номер державної реєстрації № 0119U100642, 2019–2021 рр. та 1-657-21 «Розробка методів прогнозування несучої здатності елементів конструкцій ракетної техніки без використання руйнуючих випробувань і вибір їх раціональних параметрів», номер державної реєстрації № 0121U109768, 2021–2023 рр.

Тема дисертації відображена автором у 6 статтях, з них: 2 статті у провідних міжнародних журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 4 статті у наукових фахових виданнях України. Основні результати дослідження автора є самостійними. Вважаю, що ці публікації докладно висвітлюють зміст дисертаційної роботи та її ключові положення.

Основні положення та результати дисертаційної роботи **доповідалися й обговорювалися** на підсумкових наукових конференціях Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара протягом 2020–2023 рр., а також на 15 міжнародних конференціях.

Рукопис дисертації Терьохіна Б. І. написано українською мовою та оформлено відповідно до існуючих вимог. Отримані результати дослідження за змістом повністю відповідають спеціальності 113 Прикладна математика.

У ході ознайомлення з роботою виникли такі зауваження:

1. У четвертому розділі дисертації, на рис. 4.1 (стор. 78), було б краще відобразити градієнт на включенні таким чином, щоб це відповідало

закону зміни модуля пружності, що наведено на рис. 4.2 (стор. 79). Тобто, щоб було видно, що більш жорстка зона знаходиться на середині включення.

2. У роботі всі посилання у тексті на список використаних джерел написані через кому. Вважаю, що більш доцільно було б використовувати позначку «—» для діапазону посилань, що йдуть за порядком.
3. У четвертому розділі в пункті 4.1 (стор. 77) буквами a , b позначається розмір сторін пластини, а в пункті 4.4 (стор. 111) цими ж буквами позначено розмір прямокутного отвору в оболонці, і це може викликати плутанину.
4. На стор. 113 в таблиці 4.18 для випадків, коли ККН та деформації збільшилися, відхилення δ_1 і δ_2 було б краще записати із позначкою «+».
5. Коли у розділах 3 і 4 розглядалися пластини та оболонки з круговим отвором, буквою R було позначено радіус отвору. А в пункті 4.4 (стор. 111), коли розглядалися оболонки з прямокутним отвором, буквою R було позначено радіус оболонки.

Однак суттєвих недоліків, які зменшували б цінність роботи, не виявлено. Зроблені зауваження і побажання не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Викладене демонструє, що ця дисертаційна робота є результатом самостійного та завершеного наукового дослідження. Вона характеризується актуальністю обраної теми, науковою новизною, достовірністю одержаних результатів та чіткими висновками. Дисертаційна робота має як теоретичну, так і практичну цінність. Тематика роботи відповідає спеціальності 113 Прикладна математика.

Вважаю, що дисертаційна робота Терьохіна Богдана Ігоровича «Концентрація напружень навколо отворів тонких пластин і циліндричних

оболонок із функціонально-градієнтних матеріалів», що представлена на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика відповідає встановленим вимогам відповідно наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. зі змінами від 21.03.2022 р.), а її автор Терьохін Богдан Ігорович заслуговує присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Рецензент

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри обчислювальної математики
та математичної кібернетики
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара

 Алла ШЕВЕЛЬОВА

Підпис професора Шевельової А. Є. засвідчую:

Вчений секретар ДНУ



Тетяна ХОДАНЕН