

РЕЦЕНЗІЯ

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

Актуальність теми дослідження. Останнім часом спостерігається стрімкий розвиток технологій виготовлення нових матеріалів із наперед заданими властивостями, які якнайліпше відповідатимуть вимогам до конструкцій, в яких вони використовуватимуться. Зокрема це стосується так званих функціонально-градієнтних матеріалів із просторовою зміною складу і властивостей, які знайшли своє застосування у пластинчато-оболонкових конструкціях поблизу технологічних отворів. Як відомо, будь-які отвори є концентраторами напружень, і дослідження напружено-деформованого стану поблизу них є важливою задачею як теорії пластин і оболонок, так і механіки руйнування. Використання функціонально-градієнтних матеріалів в даному випадку дозволяє знижувати концентрацію напружень, а отже, підвищує міцність таких конструкцій. У даній роботі представлено один із методів дослідження поведінки таких матеріалів в конкретних видах оболонкових конструкцій, наведено результати чисельних розрахунків та надано практичні рекомендації по підвищенню міцнісних характеристик таких конструкцій, отже, вважаю проведене Богданом Терьохіним дослідження актуальним.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з індивідуальним планом підготовки аспіранта кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Дослідження проводилися 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 не-однорідних 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.

Метою роботи було встановлення раціональних механічних і геометричних параметрів радіально-неоднорідних включень навколо отворів у тонких пластинах і циліндричних оболонках задля зменшення величини коефіцієнта концентрації напружень. В роботі сформульовано сім завдань, які потрібно було вирішити задля досягнення мети. Чотири розділи, з яких складається дисертація, повною мірою відображають виконання кожного з поставлених завдань. Вважаю, що мету роботи досягнуто.

Наукова новизна одержаних результатів сформульована у вступі роботи та полягає в такому:

- запропоновано **нові** розрахункові моделі варіаційних задач для структурно неоднорідних тіл з отворами і радіально-неоднорідними включеннями з урахуванням властивостей функціонально-градієнтних матеріалів;
- розроблено **власну методику** та побудовано алгоритми числового моделювання процесів пружного деформування пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами і включеннями з функціонально-градієнтних матеріалів;
- **вперше** досліджено НДС пластин і циліндричних оболонок з круговим отвором і радіально-неоднорідними включеннями навколо нього з нових модельних матеріалів;
- виявлено **нові** механічні ефекти на основі проведеного числового і комп'ютерного моделювання поведінки пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з круговими отворами і кільцевими включеннями з функціонально-градієнтних матеріалів з різними механічними і геометричними параметрами (закони зміни модуля пружності включень, жорсткості та варіанти їхніх розмірів) при пружному деформуванні; побудовано і досліджено зони перерозподілу інтенсивності напружень в залежності від параметрів включень з функціонально-градієнтних матеріалів;
- **вперше** на основі запропонованої методики досліджено вплив кільцевих включень з функціонально-градієнтних матеріалів на концентрацію напружень в пластинчато-оболонкових елементах конструкцій з круговими отворами; встановлено їхні раціональні параметри, що забезпечують зменшення концентрації напружень;
- отримано розв'язки низки **нових** за постановкою задач пружного деформування тонких пластин і циліндричних оболонок з отворами і включеннями з функціонально-градієнтних матеріалів, всебічно проаналізовано результати обчислювального експерименту;
- встановлено **нові** механічні ефекти і закономірності при дослідженні стану тонких пластин і циліндричних оболонок з отворами і кільцевими включеннями з функціонально-градієнтних матеріалів в умовах пружного деформування, надано практичні рекомендації щодо застосування розроблених розрахункових моделей, алгоритмів і методики знаходження раціональних механічних і геометричних параметрів включень задля зменшення концентрації напружень.

Усі отримані в роботі результати є **науково обґрунтованими**, що забезпечується коректністю постановок задач у межах теорії пружності; використанням апробованих обчислювальних схем числових методів; апробацією розробленої методики на тестових задачах та узгодженістю одержаних розв'язків із відомими з літератури; відповідністю одержаних результатів фізичній суті процесів і явищ, що вивчаються.

Теоретичне і практичне значення одержаних результатів. Розроблені в дисертаційній роботі нові розрахункові моделі, алгоритми і методика знаходження раціональних механічних і геометричних параметрів включень з функціонально-градієнтних матеріалів в пластинчато-оболонкових елементах конструкцій з отворами можуть стати науково-методичною основою для перспективних розробок в механіці деформівного твердого тіла. 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.

Важливим здобутком дисертанта та підтвердженням практичної значущості отриманих ним результатів вважаю впровадження їх в роботі ДП КБ «Південне» та в навчальний процес Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара МОН України. Зокрема, дисертантом опубліковано методичну розробку «Посібник до вивчення дисципліни «Прикладні обчислювальні технології» (Вид-во «Ліра», 2023 р.), що використовується при підготовці магістрів за спеціальністю 113 Прикладна математика, освітньо-професійна програма «Комп'ютерна механіка».

Запропонована методика по зменшенню концентрації напружень навколо отворів може бути застосована у науково-дослідних і проєктно-конструкторських організаціях при проєктуванні, розрахунку і оцінці міцності елементів конструкцій нової техніки, зокрема, ракетно-космічної.

Апробація результатів дисертації є дуже значною. Основні результати роботи доповідались і обговорювались на 15 міжнародних наукових конференціях та у цілому – на міжкафедральному науковому семінарі «Математичні проблеми механіки» Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Публікації. За темою дисертації автором опубліковано 21 наукова та 1 навчально-методична праці, з яких: 2 статті у провідних міжнародних журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 4 статті – у провідних наукових фахових виданнях України, що внесені до відповідного переліку МОН України, 15 матеріалів міжнародних наукових конференцій і тез доповідей, 1 навчальний посібник, що повністю відповідає вимогам до публікацій, викладеним у 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 від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами). Основний зміст публікацій повністю відповідає змісту дисертації.

Усі основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. В працях, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у побудові математичних моделей задач, запропонованій методиці й алгоритмі числової реалізації їх розв'язування, безпосередній участі у виконанні всіх етапів робіт: комп'ютерне моделювання, проведення обчислювальних

експериментів, інтерпретація результатів, обговорення і формулювання висновків.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, що містять 63 рисунки та 27 таблиць, висновків, списку використаних джерел із 146 найменувань і двох додатків на 6 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 143 сторінки, обсяг основного тексту 120 сторінок, що відповідає вимогам, встановленим освітньо-науковою програмою «Прикладна математика» спеціальності 113 Прикладна математика. Оформлення роботи відповідає чинним вимогам.

У вступі роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації; окреслено зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами; сформульовано мету й завдання дослідження; визначено наукову новизну, достовірність і практичне значення одержаних результатів; наведено відомості про апробацію результатів роботи, публікації та особистий внесок автора, структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел обраної для дослідження тематики. Відзначено ключові аспекти та проблеми, пов'язані з розрахунком та зниженням концентрації напружень в неоднорідних пластинах і оболонках з отворами, зокрема із функціонально-градієнтних матеріалів. Наведено наявні методи розв'язання цих задач, а також акцентовано увагу на перевагах застосування числових методів при розв'язанні складних практично важливих задач механіки деформівного твердого тіла. Розглянуто особливості використання функціонально-градієнтних матеріалів в пластинчато-оболонкових елементах конструкцій.

У другому розділі роботи наведено основні теоретичні відомості і співвідношення з теорії пластин і оболонок, основні положення методу скінченних елементів та особливості його застосування для аналізу напружено-деформованого стану тонких неоднорідних пластин і циліндричних оболонок. Представлено основні рівняння напружено-деформованого стану тонких радіально-неоднорідних пластин та наведено алгоритм розв'язання відповідної крайової задачі в аналітичному вигляді.

Розглянуто варіаційну постановку задачі для тонкостінної пластини і циліндричної оболонки, наведено відповідні функціонали повної потенціальної енергії деформації системи. Запропоновано математичні моделі варіаційних задач для випадку використання функціонально-градієнтних матеріалів.

У третьому розділі роботи запропоновано власну 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 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 із включеннями із функціонально градієнтного матеріалу та з однорідними включеннями. Виявлено, що за наявності включень із певними механічними властивостями стає можливим впливати не лише на величину коефіцієнта концентрації напружень у пластині поблизу локальних концентраторів напружень, але й на розподіл напружень по ширині включення. Визначено раціональні параметри включень в пластині, які дають змогу отримати механічний ефект в околі концентратора напружень, що полягає у зменшенні напружень і деформацій.

Для окремих випадків проведено верифікацію одержаних результатів з відомими аналітичними розв'язками.

У четвертому розділі на основі запропонованої числової методики здійснено комп'ютерне моделювання та скінченноелементний аналіз напружено-деформованого стану тонкостінних циліндричних оболонок, ослаблених круговим отвором за наявності радіально-неоднорідного кільцевого включення. Досліджено вплив розмірів включення із функціонально-градієнтного матеріалу та закону зміни його модуля пружності на концентрацію параметрів напружено-деформованого стану 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. Показано можливість впливу на коефіцієнт концентрації напружень в пластині й оболонці як з круговим, так і з прямокутним отворами за допомогою зміни механічних властивостей і геометричних характеристик включення із функціонально-градієнтного матеріалу.

Визначено раціональні параметри включень (їхній розмір і закон зміни модуля пружності), що дозволяють зменшити коефіцієнт концентрації напружень в пластині й оболонці більш ніж на 56% із механічним ефектом зменшення величини інтенсивності як напружень, так і деформацій в околі концентратора напружень.

Висновки сформульовано до кожного розділу роботи, найбільш вагомими з них, що цілком, на мою думку, відповідають поставленим завданням та логічно випливають з проведеного дослідження, подано в кінці роботи.

Високо оцінюючи представлену Терьохіним Б. І. дисертацію, вважаю за доцільне висловити деякі зауваження та побажання:

1. На с. 65 роботи в детальному описі чисельного експерименту зазначено, що «Кількість скінченних елементів – 1871, кількість вузлів – 3885. Час розрахунків у середньому – 4 с.». Виникають питання: чи є достатньою така кількість елементів для проведення розрахунків в наведених прикладах? Якщо так, то яким чином це було встановлено?
2. У роботі декілька разів згадуються «результати широкомасштабного обчислювального експерименту». Що автор має на увазі під словом «широкомасштабний»?
3. Недостатнім, на мою думку, є обґрунтування використання трикутних шестивузлових елементів для проведення розрахунків.

4. Деякі твердження автора сформульовано надто складно або невдало, наприклад: *«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»* (С. 121), *«здійснено порівняльний аналіз отриманих числових розв'язків для пластин і відповідних циліндричних оболонок з отворами і радіально-неоднорідними кільцевими включеннями»* (С. 122) (курсив мій – Т. Х.).

Проте вказані зауваження не знижують в цілому високої оцінки виконаної роботи.

Загальний висновок. Вважаю, що здобувач Терьохін Б. І. в результаті виконання дисертаційної роботи повністю оволодів методологією наукової діяльності, особисто отримав вагомі наукові результати. Отже, дисертація Терьохіна Богдана Ігоровича «Концентрація напружень навколо отворів тонких пластин і циліндричних оболонок із функціонально-градієнтних матеріалів» є закінченою науковою працею, яка відповідає вимогам 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 від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами), а її автор заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Рецензент:

доцент кафедри теоретичної
та комп'ютерної механіки
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
кандидат фізико-математичних наук,
доцент



Тетяна ХОДАНЕН

Підпис канд. фіз.-мат. наук, доц. Ходанен Т. В. засвідчую

Проректор з наукової роботи



Олег МАРЕНКОВ