

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Терьохіна Богдана Ігоровича

***«Концентрація напружень навколо отворів тонких пластин і
циліндричних оболонок із функціонально-градієнтних матеріалів»,***

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

зі спеціальності 113 Прикладна математика

Актуальність теми дисертації. Тема дисертаційної роботи Терьохіна Б.І., є актуальною, оскільки функціонально-градієнтні матеріали (ФГМ) широко використовуються на практиці завдяки їх унікальним властивостям, за рахунок яких з'являється можливість впливати на напружено-деформований стан (НДС) елементів конструкцій. Дослідження пластин і оболонок з отворами із ФГМ почалося порівняно недавно. Це обумовлено складністю математичних моделей задач та необхідністю врахування неоднорідності матеріалів при проведенні розрахунків. Особливість ФГМ дозволяє зменшити концентрацію напружень поблизу отворів, що є важливим з точки зору міцності і надійності конструкцій. Однак, для цього необхідно підібрати параметри ФГМ, які дозволять зменшити концентрацію напружень, не втрачаючи міцності, як це відбувається при використанні однорідних матеріалів. Представлена дисертаційна робота присвячена пошуку раціональних параметрів включень навколо отворів із ФГМ, наявність яких дозволяє отримати зменшення як максимальних напружень, так і деформацій в околі отворів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з планами наукових досліджень 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.

Формулювання наукової задачі, розв’язання якої одержане в дисертації. *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).

Для досягнення цієї мети автор вирішив такі *задачі*:

- розробив математичні розрахункові моделі для визначення НДС пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з неоднорідностями у вигляді отворів і включень з урахуванням властивостей ФГМ;
- розробив методику визначення параметрів НДС структурно неоднорідних тіл з радіально-неоднорідними включеннями навколо отворів при пружному деформуванні на основі використання методу скінченних елементів;
- розробив обчислювальні алгоритми запропонованої методики числового моделювання процесів пружного деформування пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами і ФГМ-включеннями;
- провів дослідження НДС пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами і радіально-неоднорідними включеннями навколо них при варіюванні механічних і геометричних параметрів включень: застосував різні модельні матеріали ФГМ-включень, закони зміни їх модуля пружності, жорсткості та варіанти їх розмірів, з вивченням впливу включень на величину ККН;
- побудував епюри і графіки розподілу інтенсивності напружень за шириною включень, виявив закономірності перерозподілу напружень і

деформацій в елементах конструкцій за наявності включень;

– здійснив порівняльний аналіз результатів числових розрахунків, отриманих у разі застосування ФГМ-включень та однорідних включень, а також з відомими аналітичними розв'язками в окремих випадках;

– виявив й дослідив загальні закономірності поведінки пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з круговими отворами за наявності навколо них радіально-неоднорідних включень; встановив раціональні з точки зору зменшення ККН механічні і геометричні параметри ФГМ-включень.

Наукова новизна отриманих автором результатів. Вважаю, що наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. У роботі запропоновано нові розрахункові моделі варіаційних задач визначення НДС структурно неоднорідних тіл з отворами і радіально-неоднорідними включеннями з урахуванням властивостей ФГМ.
2. Розроблено методику і обчислювальні алгоритми числового моделювання процесів пружного деформування пластинчато-оболонкових елементів конструкцій з отворами і ФГМ-включеннями.
3. Вперше розв'язано задачу визначення НДС пластин і циліндричних оболонок з круговим та квадратним отворами і радіально-неоднорідними включеннями навколо них з нових модельних матеріалів.
4. 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 при використанні різних законів зміни модуля пружності включень, жорсткості та варіантів їх розмірів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені в роботі методи й алгоритми надають змогу проводити дослідження актуальних задач механіки, які виникають в інженерній практиці при розрахунках міцності неоднорідних конструкцій з різноманітними концентраторами

напружень. Одержані закономірності впливу механічних і геометричних характеристик ФГМ-включень на розподіл напружень в пластині та оболонці можна використовувати для підвищення міцності та при прогнозуванні безпечної роботи відповідних конструкцій в різних галузях техніки, зокрема ракетно-космічній.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються. Дисертаційну роботу виконано на належному рівні і вона відповідає всім вимогам щодо кваліфікаційних наукових праць.

Вважаю, що одержані результати в достатній мірі є обґрунтованими і достовірними. Це забезпечується строгістю та коректністю математичних постановок задач в межах теорії пружності, апробацією розробленої методики на тестових задачах та узгодженістю одержаних розв'язків із відомими в літературі.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором особисто та за його безпосередньою участю. Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, виконаним автором відповідно до його індивідуального навчального плану. Зокрема, дисертантом проведено пошук та аналіз літературних джерел; побудова математичних моделей; числове розв'язання та ілюстрація одержаних результатів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота включає вступ, 4 розділи, висновки, список використаних джерел та два додатки.

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

У першому розділі проведено огляд праць з визначення 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. Виконаний аналіз літературних джерел щодо 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. Наведені основні рівняння, що описують НДС тонких радіально-неоднорідних пластин, та 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 задач, що розглядаються, автор використовує варіаційну постановку задачі для застосування методу скінченних елементів. Наведено функціонал повної потенціальної енергії деформації системи 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. Автором роботи здійснено 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 коефіцієнта концентрації напружень у пластині поблизу локальних концентраторів напружень, але й на розподіл напружень вздовж ширини 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 автором роботи 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 включення із функціонально-градієнтного матеріалу 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 коефіцієнт концентрації напружень в пластині й оболонці як з круговим, так і з прямокутним отворами.

Знайдено раціональні параметри включень: їх ширину та закон зміни модуля пружності, які дають змогу зменшити коефіцієнт концентрації напружень в пластині й оболонці на приблизно 56%. При цьому автором виявлено новий механічний ефект в околі концентратора напружень, який пов'язаний зі зменшенням величини інтенсивності як напружень, так і деформацій.

Висновки по роботі чіткі, логічні і впливають із результатів числового аналізу, проведеного автором.

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

Зауваження по роботі

1. У роботі розглядаються тільки модельні функціонально-градієнтні матеріали і немає прив'язки до реальних матеріалів, які використовуються у промисловості.
2. У дисертації використовуються трикутні шестивузлові лагранжеві скінченні елементи другого степеня, але немає пояснення, чому саме ці елементи були використані, а не якісь інші.
3. У роботі розглядалися відносно малі отвори. Було б цікаво побачити, як включення із функціонально-градієнтних матеріалів буде впливати на коефіцієнт концентрації напружень за наявності немалих отворів.
4. У постановці задачі розглядається оболонка з одним отвором. А на деяких рисунках розподілу інтенсивності напружень видно, що в оболонках наскрізний отвір, тобто там два отвори, зокрема на рис. 4.7 – рис. 4.9. Також у тексті немає пояснення, чому при розрахунках розглядаються два отвори, і чи буде якась відмінність.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок по дисертаційній роботі

Враховуючи актуальність, новизну, важливість одержаних автором наукових результатів, їх обґрунтованість і достовірність, а також цінність сформульованих положень і висновків, вважаю, що дисертаційна робота Терьохіна Богдана Ігоровича «Концентрація напружень навколо отворів тонких пластин і циліндричних оболонок із функціонально-градієнтних матеріалів», представлена на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика відповідає вимогам, що висуваються до кваліфікаційних наукових робіт, які встановлені 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 наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент

В.о. директора Інституту технічної
механіки НАН України і ДКА України,
завідувач відділу міцності і надійності
механічних систем інституту
член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор,



Володимир ПОШИВАЛОВ