

## ВІДГУК

офіційного опонента 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 Богдана Ігоровича «Концентрація напружень навколо отворів тонких пластин і циліндричних оболонок із функціонально-градієнтних матеріалів» присвячена пошуку раціональних параметрів включень із функціонально-градієнтних матеріалів (ФГМ) в пластинах і оболонках з отворами, що дозволяють зменшити концентрацію напружень поблизу отворів. Детальний аналіз дисертації дозволяє сформулювати наступні висновки щодо актуальності досліджень, наукової новизни, практичного та теоретичного значення отриманих результатів, а також оцінити їх ступінь апробації.

### **1. Актуальність обраної теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами**

ФГМ – дуже важлива та перспективна область в матеріалознавстві. Ця тема є актуальною з кількох причин:

1) Останнім часом все частіше на практиці використовуються ФГМ, особливість яких полягає у плавній просторовій зміні складу і властивостей. Градієнт властивостей дозволяє впливати на напружено-деформований стан з метою підвищення міцності конструкцій. Особливість ФГМ робить їх корисними, зокрема, для зниження міжфазних напружень.

2) Використання ФГМ відкриває нові перспективи для створення матеріалів з унікальними комбінаціями характеристик, що, в свою чергу, дозволяє розширювати горизонти у розробці та вдосконаленні тонкостінних конструкцій.

3) Дослідження впливу ФГМ на концентрацію напружень поблизу отворів може мати позитивний вплив на запобігання передчасного початку

руйнівних процесів, що можуть бути ініційовані певними умовами експлуатації конструкції.

Отже, пошук можливостей зниження концентрації напружень поблизу отворів в пластинах і оболонках є актуальною задачею механіки деформівного твердого тіла. Дослідження у цьому напрямку представляють як теоретичний, так і практичний інтерес для багатьох сучасних галузей техніки, зокрема ракетно-космічної.

Слід відзначити, що дослідження за темою дисертації тісно пов'язані з науковими дослідженнями, що проводились у 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 мікрodefektів, 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.

## **2. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів, наданих у дисертаційній роботі**

Усі основні результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. 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.

## **3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій**

Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів забезпечується використанням загальновизнаних положень, співвідношень та методів механіки деформівного твердого тіла; строгістю і коректністю математичних 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 в літературі; відповідністю одержаних результатів фізичній суті процесів і явищ, що вивчаються.

#### **4. Ступінь новизни результатів, їх теоретичне та практичне значення**

Новизна отриманих результатів полягає в наступному:

По-перше, у роботі запропоновано нові розрахункові моделі варіаційних задач визначення напружено-деформованого стану (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.

По-друге, вперше розв'язано задачу визначення НДС пластин і циліндричних оболонок з круговим та квадратним отворами за наявності навколо них радіально-неоднорідних включень 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 і стрічкових включень на деформаційні процеси в матеріалі в околі концентраторів напружень.

По-третє, отримано розв'язки низки нових за постановкою задач пружного деформування тонких пластин і циліндричних оболонок з отворами і ФГМ-включеннями, здійснено ґрунтовний числовий аналіз результатів широкомасштабного обчислювального експерименту.

По-четверте, знайдено раціональні параметри ФГМ-включень, що надають змогу зменшити концентрацію напружень в пластинчато-оболонкових елементах конструкцій на приблизно 56%. При цьому виявлено нові механічні ефекти і закономірності. Надано практичні рекомендації щодо застосування розроблених розрахункових моделей, алгоритмів і методики знаходження раціональних з точки зору зменшення механічних і геометричних параметрів ФГМ-включень

## **5. Практичне значення отриманих результатів**

Важливе практичне значення одержаних результатів розв'язаних задач для пластинчато-оболонкових елементів конструкцій полягає у можливості їх безпосереднього використання при прогнозуванні безпечної роботи відповідних конструкцій в машинобудуванні, енергетиці, будівництві, аерокосмічній техніці тощо. Запропонована методика щодо зменшення концентрації напружень навколо отворів може бути застосована у науково-дослідних і проектно-конструкторських організаціях при проектуванні, розрахунку і оцінці міцності елементів конструкцій нової техніки, зокрема, ракетно-космічної.

Слід відмітити, що одержані автором результати вже знайшли застосування в ДП КБ «Південне» (Довідка про впровадження, 2020 р., див. Додаток Б дисертації).

## **6. Висновок про повноту опублікування основних положень дисертації**

Результати проведених досліджень були апробовані та отримали позитивне визнання на наукових семінарах і міжнародних науково-практичних конференціях.

Матеріали дисертації достатньо повно опубліковано у 21 наукових друкованих працях, зокрема у 2 статтях у провідних міжнародних журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 4 статтях у наукових фахових виданнях України категорії Б та 15 матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Зазначені публікації з достатньою повнотою розкривають основний зміст дисертаційної роботи.

## **7. Аналіз основного змісту роботи**

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 і включеннями. Проаналізовано основні способи зниження концентрації напружень, яка виникає поблизу отворів, та вплив неоднорідності матеріалу 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. Розглянуто основні положення методу скінченних елементів та особливості його застосування для аналізу НДС тонких неоднорідних пластин і циліндричних оболонок. Для задач, що розглядаються, автор вважає доцільним використовувати варіаційну постановку задачі при застосуванні методу скінченних елементів. 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. 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 включення із функціонально-градієнтного матеріалу та закону зміни його модуля пружності на концентрацію параметрів НДС оболонок в околі отвору. Знайдено раціональні параметри включень (їх ширину і закон зміни модуля пружності), які дають змогу зменшити коефіцієнт концентрації напружень в пластині й оболонці більше ніж на 56%. При цьому має місце механічний ефект в околі концентратора напружень, що пов'язаний зі

зменшенням величини інтенсивності як напружень, так і деформацій.

**У висновках** викладені основні результати роботи. Список літературних джерел, з моєї точки зору, досить повно відображає стан справ по тематиці дисертаційної роботи.

## **8. Оцінка структури дисертації, мови та стилю викладення**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку літературних джерел, який включає 146 джерел на сторінках від 123 до 137. Загальний обсяг дисертації складає 143 сторінки, з основним текстом, який становить 120 сторінок. У роботі міститься 63 рисунки та 27 таблиць.

Текст дисертації написаний українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Викладення матеріалу в роботі є логічним та відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць, а зміст роботи висвітлює основні результати наукових досліджень.

Отримані результати досліджень за змістом повністю відповідають спеціальності 113 Прикладна математика.

## **9. Зауваження щодо змісту дисертації**

У ході ознайомлення з роботою виникли такі зауваження:

1) Слід було б більш детально описати у роботі, як виконувалося дослідження практичної збіжності результатів.

2) В огляді методу скінченних елементів доцільно було б навести розрахункові співвідношення для випадку використання трикутного шестивузлового скінченного елемента, який застосовано у дослідженні.

3) Бажано було б навести, як саме задається зміна модуля пружності включення за радіальним напрямком, або як саме це можна реалізувати в пакеті скінченноелементного аналізу.

4) У дисертаційній роботі наведено багато графіків для  $\sigma_y$ , а на рисунках розподілу напружень показана інтенсивність напружень  $\sigma_i$ , і немає пояснення як пов'язані ці напруження і яка відмінність.

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

## 10. Загальні висновки

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.

Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук, професор,  
провідний науковий співробітник  
відділу термопластичності  
Інституту механіки ім. С. П. Тимошенка  
НАН України

 Павло СТЕБЛЯНКО

Підпис професора Стеблянка П. О. засвідчую:

Вчений секретар Інституту механіки  
ім. С. П. Тимошенка НАН України



 