

## ВІДГУК

офіційного опонента кандидата фізико-математичних наук, доцента

Антоненко Ніни Миколаївни на дисертаційну роботу

*Дзундзи Наталії Сергіївни*

на тему: «Напружено-деформівний стан пружних шаруватих тіл та середовищ з ортотропними шарами», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – «Прикладна математика»

Подана на розгляд дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (179 найменувань) та додатку. Робота викладена на 164 сторінках, у тому числі містить 40 ілюстрацій, 20 сторінок списку літератури та додаток на одній сторінці.

**Актуальність роботи.** При проектуванні фундаментів, сучасних промислових будівель, споруд, дорожніх та аеродромних покриттів, проектуванні нових матеріалів все більше використовуються композитні матеріали, зокрема ті, що можуть моделюватись як пластини, шари постійної товщини, багат шарові конструкції, масиви. Але напрацювань в даному напрямку й зокрема з використанням ортотропних матеріалів на даний час в Україні та світі є недостатньо. Дослідження направлені на розробку наукових основ проектування пружних шаруватих тіл та середовищ з ортотропними шарами є актуальними.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків та рекомендацій, їх достовірність** можна оцінити як достатньо високу, що обумовлено порівнянням отриманих теоретичних результатів та практичних результатів, числових обчислень з результатами, отриманими іншими способами з використанням вільного програмного забезпечення. Всі наукові положення теоретично обґрунтовані, а отримані числові результати графічно проілюстровані.

Результати досліджень, що захищаються автором, не викликають сумнівів, тому що базуються на загально визнаних підходах та методах теорії пружності, математики, фізики, а результати експериментальних досліджень відповідають

заданим крайовим умовам, фізичному сенсу поставлених задач.

**Наукова новизна роботи:** Дисертація Дзундзи Н.С. містить елементи наукової новизни. До основних результатів роботи можна віднести:

у дисертації застосовано методику розв'язання задач плоскої теорії пружності для ортотропних матеріалів у просторі трансформант одновимірного інтегрального перетворення Фур'є;

вперше отримано розрахункові формули для ортотропних шару, півпростору, двошарового та багатошарового тіла в умовах плоскої деформації, що враховують три випадки коренів характеристичного рівняння бігармонічного диференціального рівняння для ортотропного матеріалу;

отримані авторкою аналітичні розв'язки поставлених задач дозволяють проводити розрахунки для довільних фізичних та геометричних характеристик шарів, а також кількості шарів у задачах четвертого розділу, без внесення змін до отриманих формул;

вперше поширено метод функцій податливості, розроблений для багатошарових основ з ізотропними шарами, на задачі для багатошарових основ з ортотропними шарами;

вперше виведені рекурентні формули функцій податливості для багатошарової ортотропної основи та проведено їх дослідження.

**Мета і завдання дослідження.** Дисертантка метою своєї дисертаційної роботи ставить розробку підходів до розв'язання задач плоскої теорії пружності щодо визначення напружено-деформівного стану тіл (шарів, півплощин, двошарових тіл та багатошарових основ) з урахуванням особливостей ортотропного матеріалу, практичну реалізацію розроблених підходів.

Для реалізації поставленої мети Наталії Сергіївні потрібно було реалізувати наступні завдання:

– провести аналіз предметної області за темою дисертації, зокрема досліджень як вітчизняних, так й закордонних науковців щодо підходів до розв'язання задач теорії пружності шаруватих конструкцій, тіл, структур з ортотропних матеріалів;

– сформулювати концептуальні та математичні постановки невирішених задач, побудувати математичні моделі для розв'язання поставлених задач для пружних ортотропних шару, півпростору, двошарового та багатошарового тіла;

– розробити алгоритм розв'язку кожної з поставлених задач та отримати аналітичні розв'язки в просторі трансформант Фур'є;

– поширити метод функцій податливості, розроблений для багат шарових основ з ізотропними шарами, на задачі для багат шарових основ з ортотропними шарами;

– розв’язати конкретні задачі про дію поверхневого навантаження на шар, півплощину, двошарову та багат шарову основи;

– зробити порівняльний аналіз результатів експериментів із доступними аналітичними або експериментальними даними.

**Важливість отриманих автором дисертації результатів для науки і практики.** Отримані дисертанткою теоретичні та практичні результати числових розрахунків розвивають методи розв’язання задач плоскої теорії пружності для ортотропних композитних матеріалів, дають можливість більш об’єктивно оцінювати напружено-деформований стан таких тіл як шар, півплощина, шар зчеплений з півплощиною та багат шарові основи.

Практична цінність результатів роботи полягає в можливості застосування розробленого методу в задачах розрахунку напружень і переміщень в шаруватих ортотропних тілах, задачах аналізу та проектування шаруватих структур з ортотропними шарами.

Розроблені методики, отримані результати досліджень можуть бути застосовані в будівництві та при проектуванні шаруватих покриттів.

**Відсутність порушень академічної доброчесності.** Текстові запозичення, що зустрічаються в роботі, оформлені у відповідному порядку, містять коректні посилання на дослідження інших авторів і не мають ознак плагіату. Використання авторкою скінченно-елементного пакету QFEM, як програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом не порушує Закон України «Про авторське право і суміжні права».

**Повнота викладу в опублікованих працях.** Основні наукові результати дисертаційної роботи висвітлено у дванадцяти публікаціях, серед них: одна – у виданні, індексованому в наукометричній базі Scopus; чотири статті – у наукових фахових виданнях України; одна стаття – у закордонному періодичному виданні. Всі основні положення дисертації повністю відображені в публікаціях авторки.

**Апробація результатів досліджень.** Основні положення та проміжні результати дисертації пройшли апробацію на всеукраїнських та міжнародних конференціях, що знайшло відображення в опублікованих матеріалах цих

конференцій, а саме одна – у матеріалах закордонної міжнародної конференції, одна – у матеріалах університетської науково-практичної конференції, та чотири – у матеріалах всеукраїнських наукових конференцій молодих дослідників.

### **Основний зміст роботи**

У **вступі** розміщені обов'язкові елементи: обґрунтування актуальності теми дослідження, сформульована мета та завдання наукового дослідження, зазначено об'єкт та предмет дослідження, наведено опис використаних методів дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульована наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, наведена інформація про апробацію результатів роботи та особистий внесок здобувача, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**Перший розділ** дисертації (16 сторінок) містить аналіз сучасного стану існуючих наукових досліджень за темами, що пов'язані з тематикою дисертації, проаналізовано питання сучасних підходів до розрахунку напружено-деформівного стану пружних ізотропних та анізотропних тіл, тіл шаруватої структури. Виконано аналіз застосування методу функцій податливості до дослідження НДС багат шарових основ з ізотропними та трансропними шарами.

За результатами аналізу було обрано основні напрямки та сформульовано задачі наукових досліджень для створення єдиної методики дослідження НДС шаруватих тіл з ортотропними шарами.

**Другий розділ** дисертації (50 сторінок) присвячено розв'язанню задач про визначення напружено-деформівного стану ортотропного шару та ортотропного півпростору в умовах плоскої деформації.

Першою розглядається задача про визначення напружено-деформівного стану ортотропного шару методом інтегрального перетворення Фур'є. Задача формулюється в трьох постановках, які відповідають основним крайовим (межовим) задачам механіки деформованого твердого тіла.

Розв'язок задачі шукається в просторі трансформант одновимірного інтегрального перетворення Фур'є. Трансформанти напружень та переміщень виражаються через трансформанту функції напружень. Побудовано розрахункові формули із врахуванням всіх можливих типів функції напружень в просторі трансформант та граничних умов задачі.

Також розглядається задача про визначення напружень та переміщень в

пружній ортотропній півплощині, яка знаходиться під дією зовнішнього навантаження.

Окремим випадком розглядається задача про дію зосередженої сили нормальної до поверхні пружної однорідної, суцільної ортотропної півплощини.

Розв'язано конкретні задачі про дію поверхневого навантаження на шар і півплощину. На базі отриманих аналітичних розв'язків зроблені числові розрахунки, побудовані графіки та виконаний їх аналіз. Отримані розрахунки свідчать про адекватність результатів.

**Третій розділ** дисертації (13 сторінок) присвячено розв'язанню задачі про визначення напружено-деформівного стану двошарового тіла, а саме ортотропного шару зчепленого з ортотропною півплощиною, на яке діють зовнішні нормальні та дотичні навантаження.

Запропонований підхід побудовано на методі одновимірної інтегральної перетворення Фур'є, при цьому пошук невідомих величин ведеться в просторі трансформант Фур'є.

Проведено дослідження особливостей напружено-деформівного стану в ортотропному двошаровому тілі. Вперше отримано розрахункові формули необхідні для реалізації алгоритму для знаходження напружень і переміщень для ортотропного двошарового тіла в умовах плоскої деформації. Отримано чисельно-аналітичний розв'язок поставленої задачі, проведено числові розрахунки та виконано їх аналіз.

Було проведене порівняння отриманого розв'язку задачі за запропонованою схемою з розв'язком отриманим методом скінченних елементів (МСЕ) за допомогою скінчено-елементного пакету QFEM.

Зауважу, що наведена схема є органічним розвитком підходу, що описаний у другому розділі.

У **четвертому розділі** (39 сторінок) дістали подальшого розвитку математичні моделі механіки багатошарових основ простої та складної структури, метод функцій податливості, який раніше був розроблений тільки для основ з ізотропними та трансропними шарами. У розділі сформульовано постановки задач для багатошарової основи з ортотропними шарами, побудовано математичну модель і запропоновано підхід до розв'язання задач для ортотропного матеріалу. Вперше поширено метод функцій податливості на задачі для багатошарових основ з ортотропними шарами.

Всі формули, наведені авторкою в дисертації є вперше виведеними, а саме виведено рекурентні формули функцій податливості для багат шарової ортотропної основи та проведено їх дослідження, розрахункові формули, необхідні для реалізації алгоритму знаходження напружень і переміщень в ортотропній багат шаровій основі в умовах плоскої деформації.

Розв'язано задачу про дію поверхневого навантаження на тришарову основу, отримано числові результати і проведено їх аналіз, що підтверджує ефективність застосування запропонованого підходу.

**Висновки** по роботі повністю відповідають меті та завданням дисертаційного дослідження.

Результати дисертаційної роботи повністю висвітлені в публікаціях авторки Дзундзи Н. С. та апробовані на університетській, всеукраїнських та міжнародній наукових конференціях. Всі публікації мають безсумнівне відношення до теми дисертації. Кількість та якість публікацій задовольняє вимогам п.8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», «Положенню про присудження наукового ступеня доктора філософії у Запорізькому національному університеті».

**Мова та стиль дисертації** свідчать про вміння Дзундзи Н.С. аргументовано, логічно, послідовно, фахово викладати свої думки та відповідають вимогам МОН України. Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки, отримані аналітичні розв'язання викладені у логічній послідовності та доказовій формі. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність при цьому прослідковується логічний розвиток між розділами.

Змістовне наповнення, матеріал підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

Висновки до кожного розділу є логічними та обґрунтованими.

**Відповідність роботи вимогам, які ставляться до дисертації.** За актуальністю та важливістю розв'язаних наукових задач, повнотою теоретичного обґрунтування, обсягом проведених теоретичних та числових досліджень, новизною постановок задач, новизною сформульованих алгоритмів, отриманими числовими результатами дисертаційна робота Дзундзи Наталії Сергіївни **відповідає вимогам** “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”, затвердженому

постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р., “Положення про присудження наукового ступеня доктора філософії у Запорізькому національному університеті”, введеного в дію наказом №35 ректора ЗНУ від 31.01.2024, та вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України.

Разом з тим, до дисертаційної роботи є наступні **зауваження**:

1) До числових розрахунків виникають наступні питання:

З якою точністю вони були розраховані?

Як виконувалась перевірка отриманих результатів?

Яким чином проводилось обчислення інтегралів при зворотному інтегральному перетворенні?

2) Для двошарової та тришарової конструкцій бажано б було розглянути всі можливі комбінації випадків для функцій напружень кожного з шарів (різні випадки коренів характеристичних рівнянь).

3) По тексту роботи та в назвах статей фігурує як термін напружено-деформівний так й напружено-деформований стан, хоча доречно було б використання єдиного формулювання. Також в тексті дисертації зустрічаються вживання таких термінів як «граничні умови» та «крайові умови», хоча за формою та виглядом вони є однакового типу.

**Загальні висновки.** Зазначені вище зауваження не є принциповими та не впливають на високу позитивну загальну оцінку дисертаційної роботи й не знижують ступінь обґрунтованості та достовірності основних отриманих результатів і висновків.

Дисертаційна робота *Дзундзи Наталії Сергіївни* на тему: «Напружено-деформівний стан пружних шаруватих тіл та середовищ з ортотропними шарами», представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – «Прикладна математика» є завершеним науковим дослідженням, яке за актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю, науково-теоретичною та науково-практичною значущістю отриманих результатів 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 № 44 від 12 січня 2022 року, «Положення про присудження наукового ступеня доктора філософії у Запорізькому національному університеті», введеного в дію наказом №35 ректора ЗНУ від 31.01.2024, та

вимогам до оформлення дисертації, а її автор – Дзундза Наталія Сергіївна – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Офіційний опонент:

доцент кафедри математики

Національного університету

«Запорізька політехніка»,

кандидат фізико-математичних наук, доцент

Ніна АНТОНЕНКО