

## В І Д Г У К

офіційного опонента

д-ра техн. наук проф. Дзюби Анатолія Петровича  
на дисертаційну роботу *Дзундзи Наталії Сергіївни*

на тему: «Напружено-деформівний стан пружних шаруватих тіл та середовищ з ортотропними шарами», подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – «Прикладна математика»,  
галузі знань: 11 Математика та статистика

### **Актуальність роботи.**

Композиційні матеріали, зокрема багатошарові, знаходять все більше застосування в різних галузях техніки, промисловості, будівництва, що пояснюється властивостями, які вигідно відрізняють їх від традиційних однокомпонентних матеріалів. У той же час, композитний матеріал у багатьох випадках створюється разом з конструкцією, тому визначення фізико-механічних властивостей таких матеріалів та задач створення, проектування нових матеріалів із заданими властивостями обумовлює необхідність теоретичних та практичних наукових досліджень в цьому напрямку.

Розробці моделей та методів дослідження напружено-деформованого стану шаруватих композитів приділяється значна увага. Однак, проблемні задачі аналізу впливу анізотропії, зокрема ортотропії шарів, на розподіл напружень та деформацій в неоднорідних шаруватих конструкціях за товщиною багатошарових основ з композиційного матеріалу все ще чекають свого вирішення.

Тому розробка методів та підходів до аналізу НДС шаруватих тіл, багатошарових композитних матеріалів, а саме багатошарових основ з ортотропними шарами на основі математичної моделі, що дозволяє розв'язувати задачу аналітично або чисельно-аналітично, є актуальною науковою задачею сучасної механіки деформівного твердого тіла.

### **Мета і завдання дослідження**

*Метою* дисертаційної роботи є розробка підходів, методів та алгоритмів визначення напружено-деформованого стану шаруватих тіл (півплощин, двошарових тіл та багатошарових основ) з урахуванням особливостей ортотропного матеріалу.

*Об'єктом дослідження* є процеси деформування, а *предметом* – компоненти напружено-деформівного стану в пружних шаруватих тілах та середовищах з ортотропними шарами під дією поверхневого навантаження.

*Методика* дослідження ґрунтується на застосуванні методу одновимірного інтегрального перетворення Фур'є та методу функцій податливості.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертаційної роботи Дзундзи Н.С. повністю відповідає науковому напрямку спеціаль-

ності «Прикладна математика».

Проведені в межах дисертаційної роботи дослідження виконані у відповідності до планів наукових досліджень Запорізького національного університету в рамках науково-дослідної теми: “Чисельні та аналітичні методи розв’язання диференціальних та інтегральних рівнянь задач механіки деформівного твердого тіла” (номер державної реєстрації 0121U114696).

**Основні завдання дослідження сформульовані наступним чином:**

- провести огляд методів і підходів та аналіз сучасної предметної області з досліджень напружено-деформівного стану неоднорідних пружних тіл, зокрема, шаруватих структур з ортотропних матеріалів;
- побудувати математичні моделі для розв’язування задачі визначення напружено-деформованого стану шару, півпростору, двошарового та багатошарового тіла;
- отримати розрахункові формули для ортотропного шару, півпростору, двошарового та багатошарового тіла в умовах плоскої деформації для ортотропного матеріалу;
- розробити алгоритм розв’язку задач плоскої теорії пружності для багатошарової основи з ортотропними шарами, який враховує особливості властивостей ортотропного матеріалу і дозволяє отримувати аналітичні розв’язки в просторі трансформант Фур’є;
- поширити метод функцій податливості, розроблений для багатошарових основ з ізотропними шарами, на задачі для багатошарових основ з ортотропними шарами;
- вивести рекурентні формули функцій податливості для багатошарової ортотропної основи та провести їх дослідження;
- розв’язати конкретні задачі про дію поверхневого навантаження на шар, півплощину, двошарову та багатошарову основи;
- зробити порівняльний аналіз результатів експериментів із доступними аналітичними або експериментальними даними.

Всі сформульовані вище пункти відповідають тематиці дисертації та виконані авторкою у повному обсязі.

**Основні результати та наукова новизна роботи.**

Основні результати дисертації наступні:

- коректно сформульовано алгоритм розв’язку першої основної граничної задачі плоскої теорії пружності для багатошарової основи з ортотропними шарами;

- отримано аналітичні 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;
- узагальнено метод функцій податливості, розробленого для багатошарових основ з ізотропними шарами для випадку багатошарової основи з ортотропними шарами;
- вперше отримані рекурентні формули функцій податливості для багатошарової ортотропної основи та проведено їх дослідження;
- продемонстровано можливість застосування підходу шляхом розв'язування конкретних задач для шару, півплощини, двошарової основи (шар зчеплений з півплощиною) та тришарової основи.

*Теоретичне значення результатів* дисертаційної роботи Дзундзи Н.С. полягає в узагальненні методу функцій податливості, розробленого для багатошарових основ з ізотропними шарами, на задачі для багатошарових основ з ортотропними шарами, які дають можливість дослідити НДС таких основ з високою точністю.

*Практичне значення* розроблених в роботі підходів і моделей (як аналітичних і точних) полягає в можливості їх використання як еталонів для наближених і чисельних методів в задачах розрахунку напружень і переміщень в шаруватих структурах з ортотропними шарами.

Побудовані в роботі методи та результати можуть бути використані і безпосередньо при розв'язанні конкретних практичних задач промисловості, будівництва, а також в учбових програмах для підготовки докторів філософії у галузі 11 – Математика та статистика, за спеціальністю 113 "Прикладна математика" в рамках галузі знань.

У цілому результати дисертаційної роботи є вагомим внеском у розвиток методів розв'язування задач плоскої теорії пружності для ортотропних композитних матеріалів. Отримані теоретичні та практичні результати дозволяють більш точно оцінювати напружено-деформований стан різних конструкцій, таких як шар, півплощина, зчеплений з півпростором шар, а також багатошарові основи з ортотропними шарами, і мають як наукове, так і методологічне значення, оскільки можуть виступати тестовими для подальшого розвитку цього напрямку у механіці неоднорідних структур.

### **Обґрунтованість наукових положень дисертації.**

Постановки розглянутих в дисертації задач є коректними.

Результати досліджень, ґрунтуються на класичних методах теорії пружності та математики і добре узгоджуються з фундаментальними фізичними законами.

Результати числових експериментів відповідають заданим крайовим умовам, фізичному сенсу поставлених задач та добре узгоджуються, де це можливо, з відомими даними.

Можна вважати, що всі наукові положення поданої дисертації та отримані наукові результати у вигляді аналітичних розв'язків, числових розрахунків та висновків є достатньо обґрунтованими та достовірними.

### **Структура та основний зміст роботи.**

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (179 найменувань) та одного додатку. Робота викладена на 164 сторінках, містить 40 ілюстрацій, 20 сторінок списку використаних джерел та додаток на одній сторінці.

**Вступ** містить 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 роботи.

У **першому розділі** дисертації досліджено сучасний стан наукових досліджень щодо розрахунку напружено-деформованого стану пружних тіл з ізотропними та анізотропними характеристиками, а також тіл шаруватої структури. Проведено аналіз основних підходів до вирішення зазначеної проблеми. Визначено головні напрямки та задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** дисертації побудовані розв'язки задач про визначення напружено-деформованого стану ортотропного шару та ортотропного півпростору в умовах плоскої деформації.

Розглянута задача визначення напружень та переміщень в пружному суцільному, без дефектів ортотропному шарі постійної товщини з відомими модулями пружності у трьох варіантах, що відповідають основним крайовим задачам механіки деформівного твердого тіла.

Далі розглядається задача визначення напружень та переміщень у пружній ортотропній півплощині під дією зовнішнього навантаження.

Окремо досліджується випадок зовнішнього навантаження у вигляді зосередженої сили, що діє нормально до поверхні пружної однорідної ортотропної півплощини. Для цієї задачі отримані аналітичні розв'язки. Подані результати числових розрахунків, побудовані графіки та проведений їх аналіз.

У **третьому розділі** дисертації розглянута задача визначення напружено-деформованого стану ортотропного шару зчепленого з ортотропною півплощи-

ною. Подана математична постановка задачі, математична модель, схема загального розв'язання та алгоритм її реалізації.

Запропонований підхід ґрунтується на використанні методу одновимірного інтегрального перетворення Фур'є. Дисертантка отримала розрахункові формули, необхідні для реалізації алгоритму.

Подані чисельно-аналітичні розв'язки задач з конкретними значеннями модулів пружності для шару і півплощини та результати порівняння отриманого розв'язку для задачі з ізотропними матеріалами з розв'язком отриманим методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням скінченно-елементного пакету QFEM.

У **четвертому розділі** розглядається задача визначення НДС в шарах багатошарової основи, яка являє собою пакет з  $n$  необмежених в плані плоско паралельних зчеплених між собою пружних ортотропних шарів. Побудовано математичну модель і запропоновано підхід до розв'язання, отримані всі необхідні для програмної реалізації аналітичні формули.

Для вирішення задачі розроблена модифікація методу функцій податливості, який був розроблений тільки для основ з ізотропними та трансропними шарами.

Наведено приклади розрахунку напружено-деформованого стану ортотропної тришарової основи, проведено аналіз отриманих числових результатів.

Загальні **висновки** по роботі повністю відповідають поставленим меті та завданням дисертаційного дослідження.

**Мова та стиль дисертації** демонструють вміння Дзундзи Н.С. працювати з науковою літературою, інформаційними джерелами, аргументовано, логічно, послідовно та фахово викладати свої думки.

Дисертація написана українською мовою на високому науково-професійному рівні та відповідає вимогам МОН України. Виклад результатів досліджень, висновків є чітким і доступним для сприйняття.

Основні положення, висновки та аналітичні розв'язання, викладені у дисертаційній роботі, представлені у логічній послідовності. Кожен розділ дисертації є завершеним дослідженням. Між розділами є логічний та змістовий зв'язок.

Змістовне наповнення підрозділів відповідають змісту визначених розділів, а наповнення розділів відповідають темі дисертації.

Висновки кожного розділу та загальні висновки по дисертації є логічними та обґрунтованими.

**Відсутність порушень академічної доброчесності.** Текстові цитування, що є в роботі, містять правильні посилання на дослідження інших авторів.

Використання дисертанткою ПЗ з відкритим вихідним кодом, а саме скінченно-елементного пакету QFEM, здійснене відповідно до законодавства України «Про

авторське право і суміжні права».

**Апробація результатів досліджень.** Основні тези та проміжні результати дисертації були представлені на 5-ти всеукраїнських та міжнародній конференціях і опубліковані у відповідних матеріалах цих конференцій.

**Повнота викладу в опублікованих працях.** Основні наукові результати дисертаційної роботи висвітлено у фахових публікаціях, серед яких: одна – у виданні, індексованому в наукометричній базі Scopus; 4 статті – у наукових фахових виданнях України; одна стаття – у закордонному періодичному виданні. Всі основні положення дисертації повністю відображені в публікаціях Дзундзи Н.С.

Таким чином, результати дисертаційного дослідження повністю відображені в публікаціях Дзундзи Н. С., пройшли апробацію на міжнародній, всеукраїнських та університетській наукових конференціях. Всі опубліковані праці відповідають темі дисертації.

Якість публікацій у фахових періодичних виданнях України а також їх кількість відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» та «Положенню про присудження наукового ступеня доктора філософії у Запорізькому національному університеті».

**Як зауваження до змісту роботи слід зазначити:**

1. В задачі дослідження дії зосередженої сили на півплощину ( п 2, 2.2) нормальна до півплощини сила розподіляється на проміжок  $[-\tilde{a}, \tilde{a}]$ . Не вказується як розв'язок залежить від значень  $\tilde{a}$  та яким чином слід вибрати значення  $\tilde{a}$  для забезпечення достовірності розв'язку.

2. В прикладах задач п. 2.3 прийняті модулі пружності від  $E_x = 5,9 \times 10^{11} \text{Па}$  (приклад 1) (це майже в три рази вище ніж у сталі) до  $E_x = 1,7 \times 10^3 \text{Па}$  (приклад 4 та 5) ( для порівняння  $E_x$  паперу (ватман) складає  $6,9 \times 10^9 \text{Па}$  ). Тут слід було б подати назви матеріалів, які використані в цих прикладах.

3. Упродовж викладення матеріалу в дисертації йде мова про отримання розрахункових формул (аналітичні розв'язки) , в той час як вигляд результатів (рисунки 2.4 –2.9, 2.12, 2.13, 4.3, 4.4, 4.8–4.11 та ін.) мають дискретний характер. Яким чином отримані ці результати?

4. На стор. 86  $\beta(\xi); \gamma(\xi)$  підраховані з точністю до 10-ої значущої цифри. Як це пов'язано з необхідністю такої точністю?

5. Не пояснено, який смисл в дисертації носить поняття «концептуальна постановка», оскільки за визначенням концепція – це система поглядів, повне розу-

міння явищ і процесів, визначальний задум і т. ін.

6. В п. 2.3 (і в змісті дисертації) слід було б замість методичного викладення: приклад 1, приклад 2 і т.д. подати в заголовках назви відповідних досліджуваних задач.

Зазначені вище зауваження не знижують актуальність, теоретичне та практичне значення дисертації, ступінь обґрунтованості та достовірності отриманих результатів і висновків, і тому не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

#### **Загальні висновки.**

Дисертаційна робота *Дзундзи Наталії Сергіївни* на тему: «Напружено-деформівний стан пружних шаруватих тіл та середовищ з ортотропними шарами», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – «Прикладна математика», є завершеним науковим дослідженням. Дисертаційне дослідження виконане на актуальну тему, теоретичні положення чітко обґрунтовані, отримані результати мають наукову новизну, теоретичне і науково-практичне значення та відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженою Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, «Положенню про присудження наукового ступеня доктора філософії у Запорізькому національному університеті», введеного в дію наказом №35 ректора ЗНУ від 31.01.2024р. та вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом МОН України, а її авторка Дзундза Наталія Сергіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Офіційний опонент:

професор кафедри теоретичної  
та комп'ютерної механіки

Дніпровського національного університету  
імені Олеся Гончара,

Заслужений діяч науки і техніки України,  
доктор технічних наук, професор

Анатолій ДЗЮБА

09.07.2024

Підпис Анатолія Дзюби засвідчую,  
Проректор з наукової роботи



Олег МАРЕНКОВ