

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Стасюка Богдана Мирославовича **“Гранично-елементний аналіз пружних властивостей тривимірних композитних структур з неканонічними включеннями та дефектами”**, подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність тематики дисертації. Моделювання задач механіки композитів, якій присвячена дисертаційна робота, у наш час одна з найзатребуваніших практикою областей знань, яка відкриває широке поле застосувань числових методів досліджень. Особливо це стосується композитних структур тривимірної побудови, де просторовість компонент або форми включень ускладнює, а часто унеможлиблює застосування аналітичних підходів. У більшості випадків числове моделювання не накладає обмежень на способи навантаження композитних тіл і характеристики матеріалів складових. До переваг числових підходів слід віднести також можливість інкорпорації числових результатів в узагальнені моделі з метою розширення об'єкту досліджень, наприклад у співвідношення гомогенізації композитних середовищ для визначення їх ефективних властивостей.

Набір числових підходів до розв'язання тривимірних задач механіки композитів відносно широкий і базується на дискретизаціях за методами скінченних різниць, скінченних і граничних елементів. Кожен з них володіє певною ефективністю числового аналізу з огляду на специфіку розглянутих задач. Так метод граничних елементів більш пристосований до врахування різноманітних контактних умов зі стрибками механічних полів на поверхнях поділу матеріалів. Моделювання тонкостінних включень і тріщин стрибками переміщень і напружень в їх областях також забезпечує переважне застосування цього методу. Важливим напрямком є симбіоз різних методів числового дослідження, наприклад за опису композитів системами рівнянь, для частини з яких відсутні фундаментальні розв'язки. Це стається під час залучення додаткових рівнянь деформування матеріальних поверхонь нановключень.

Досі потенціал методу граничних елементів у цих напрямках продемонстровано здебільшого щодо двовимірних композитних структур. Тому розглянута дисертаційна робота з розв'язання тривимірних задач для пружних тіл і середовищ з включеннями загальної форми, нанорозміру та за присутності контактних недосконалостей і тріщин на основі методу граничних елементів є **теоретично і практично актуальною**.

Наукова новизна результатів. У дисертаційній роботі отримано граничні інтегральні рівняння, що враховують адаптованим вибором невідомих різні типи умов механічного контакту між матрицею і включенням загальної об'ємної форми, зокрема досконалого, ковзного та адгезивного (через прошарок). Розроблено оригінальні схеми регуляризації та дискретизації цих рі-

внянь з використанням просторових ізопараметричних і суперпараметричних граничних елементів, їх плоских образів і відображень з регуляризуючими якобіанами. Дискретизацію поширено на системи із сингулярних інтегральних рівнянь у переміщеннях та гіперсингулярних у напруженнях, дуальність яких визначається розглядом взаємодії об'ємних і тонкостінних включень та тріщин між собою та з поверхнею обмеженого тіла. Запропоновано схему ітераційного врахування граничноелементними розв'язками взаємодії в розріджено-великих системах включень і тріщин. Метод граничних елементів поєднано з гомогенізаційними методами для дослідження ефективних пружних властивостей композитів зі скінченними волокнами, а також з методом скінченних різниць для дослідження нанокомпозитів з ефектами власної пружності і натягу міжфазних поверхонь. Здійснено комплексний аналіз переміщень, напружень та ефективних модулів пружності стосовно композитних тіл і середовищ неklasичного типу.

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертації забезпечується коректністю та строгістю постановок задач, використанням відомих положень механіки деформівного твердого тіла, застосуванням апробованих числових методів. Експериментально перевірено збіжність усіх числових розв'язків. Результати, отримані різними гранично-елементними підходами, узгоджуються між собою в межах їх спільної застосовності та з відомими в літературі окремими випадками. Проведений натурний експеримент доводить можливість використання результатів числового моделювання для опису механічних характеристик реальних композитних матеріалів.

Апробація дисертації та повнота її викладу в опублікованих працях. Основні результати роботи отримані автором самостійно та були представлені на наукових семінарах, вітчизняних та міжнародних конференціях з механіки деформівного твердого тіла. За темою дисертації опубліковано 35 наукових праць, з яких 16 статей у фахових журналах. Десять статей прореферовані у міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science, що свідчить про їхню високу якість та цитоване визнання в міжнародному науковому середовищі. Згідно з класифікацією SCImago Journal and Country Rank, одна стаття входить до кuartилію Q1, дві – до Q2, а решта – до Q3.

Практична корисність дисертації полягає у застосовності її результатів у технологіях проектування та виготовлення композитних матеріалів, які дозволяють покращити експлуатаційні характеристики та продовжити ресурс виробів і конструкцій із них. Запропоновані числові методи симуляції є ключовими для врахування форми та структуризації наповнювачів, наявності контактних недосконалостей та тонких внутрішніх концентраторів напружень, а також для моделювання ефектів взаємодії і нанорозміру армуючих елементів. Ці методи дають можливість прогнозувати локальні розподіли напружень і ефективні пружні характеристики мультикомпонентних матеріалів на основі широкого спектру вхідних даних щодо топології і жорсткості складових. Завдяки цьому, розроблений у дисертації числовий інструментарій можна

використовувати для оптимізації створення композитів з наперед заданими механічними властивостями.

Загальна характеристика дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, кожен з яких завершується висновками, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Структура роботи організована логічно та послідовно, ефективно розкриває зміст викладеного матеріалу.

У *вступі* аргументується актуальність обраної теми, визначаються мета і завдання дослідження, з'ясовується зв'язок із сучасними науковими програмами, вказується предмет і об'єкт дослідження, а також відзначається наукова новизна роботи. Узагальнюється теоретичне значення та практична важливість результатів, вказується внесок дисертанта, а також наводяться відомості щодо апробації роботи, публікацій і загальної структури дисертації.

Огляд літературних джерел у *першому* розділі дисертації проведено з метою встановлення сучасного стану досліджень, пов'язаних з числовим аналізом композитних матеріалів. Розглянуто різноманітні підходи до вирішення задач теорії пружності для матриці з поодинокими та множинними неоднорідностями. Окреслено можливості та області застосовності числових методів, зокрема методу скінченних елементів і методу граничних елементів, які дозволяють аналізувати складні композитні структури.

У *другому* розділі наведено алгоритми розв'язування тривимірних задач пружної рівноваги матриці з ідеально сконтактованим об'ємним включенням, які демонструють виведення інтегральних рівнянь, їх регуляризацію та граничноелементну дискретизацію. Використовуючи ізопараметричні та суперпараметричні граничноелементні сітки, числово проаналізовано механізми передачі навантажень у композитних тілах з включенням у формі прямолінійного та викривленого волокна. Числові результати порівнюються з окремими аналітичними розв'язками для підтвердження їхньої точності.

У *третьому* розділі гранично-елементний аналіз узагальнено на задачі з системами об'ємних та тонкостінних включень і тріщин. Для розріджених систем з великими масивами взаємодіючих тріщин та різного роду включень у безмежній пружній матриці граничноелементний аналіз модифіковано шляхом введення ітерацій односторонніх взаємодій. Як приклад, числово досліджено інтенсивність напружень поблизу тріщини, що взаємодіє з різними за формою та жорсткістю включеннями.

У *четвертому* розділі числовий аналіз перенесено на обмежене пружне тіло зі скінченним числом тонких включень і тріщин. Розглянуто пружні тіла канонічної форми та встановлено вплив поверхневих факторів на напруження біля поодинокі та множинних внутрішніх тріщин. Отримано гранично-інтегральні рівняння відповідних задач і розроблено гранично-елементний алгоритм дискретизації цих рівнянь з урахуванням силової та кінематичної дії на поверхню обмежених тіл. Проведено числовий розрахунок взаємодії тонких включень і тріщин у порожнистому циліндрі та призматичному тілі,

проаналізовано вплив зовнішнього навантаження на концентрацію напруження біля дефектів.

У *п'ятому* розділі дисертації здійснено гранично-елементний аналіз тривимірних задач про неідеальний контакт між матрицею та включенням, що моделює проковзування, або наявність тонкого податливого прошарку. Умови ковзного контакту формулюються у локальній системі координат, яка хоча й ускладнює ансамблювання матриць рівнянь, але необхідна для коректної дискретизації. Числово продемонстровано значне зниження напружень всередині включення у випадку міжфазного проковзування з матрицею. Досліджено роль стрибків дотичних переміщень на поверхні ковзного з'єднання. Розглянуто взаємодію матричної тріщини з об'ємним включенням з урахуванням ковзних умов зчеплення, коли встановлено, що фактор ковзного контакту може по-різному впливати на інтенсивність напружень біля тріщини залежно від жорсткості матриці та включення.

У *шостому* розділі дисертації проведено числове дослідження ефективних модулів пружності тривимірних композитів з волокнистими включеннями, використовуючи гомогенізаційні співвідношення Морі-Танаки та гранично-елементні розв'язки для репрезентативного елемента середовища. Підхід застосовано до композитів з впорядкованими та випадковими орієнтаціями волокон і композитів з ковзним контактом на міжфазних поверхнях. Створено узагальнену гомогенізаційну модель для композиту із стрибками полів на міжфазних поверхнях. Розрахунки проведено для п'яти ефективних технічних модулів пружності композиту, з верифікацією результатів окремими аналітичними розв'язками. Досліджено вплив ковзного контакту на ефективні властивості композиту зі сфероциліндричними включеннями. Експериментальна верифікація числових розрахунків показала добре узгодження для призматичних зразків фібробетону.

У *сьомому* розділі дисертації розглядаються локальні і ефективні пружні властивості тривимірних композитів з урахуванням нанорівневої матеріальності міжфазних поверхонь. Представлений гібридний гранично-елементно-скінченно-різницевий алгоритм враховує пружність і натяг на міжфазній поверхні між матрицею та нановключенням, що дозволяє зберігати замкнутість розрахункових рівнянь. Виявлено контраст пружних властивостей нанопористого середовища порівняно з макропористим, визначено ефективні модулі пружності залежно від типу матеріальних поверхонь, а також досліджено вплив видовження пустот на цей контраст.

До роботи, на наш погляд, є **зауваження**, які однак не применшують загальне враження від неї та не впливають на позитивну оцінку роботи:

1. Використання ізопараметричних і суперпараметричних апроксимацій вимагає аргументації щодо використання тієї чи іншої в кожному наведеному прикладі розрахунків. А інформація дається в тексті дисертації і автореферату лише фрагментарно.

2. У дисертаційній роботі відсутні міркування щодо оптимальних пропорцій густин сіток граничноелементного розбиття циліндричної і сферичної частин волокон, зважаючи на їх видовження і викривлення. Це важливий аспект, оскільки якість сітки може суттєво впливати на точність результатів.
3. У п'ятому розділі зазначається, що використання локальної системи координат для задач з неідеальним контактом компонент композиту трансформує процес ансамблювання матриць дискретних аналогів. Було б корисно вияснити, які саме труднощі виникають при цьому та як вони вирішувались.
4. Під час дослідження макровластивостей композитів у різних прикладах розрахунків фігурують ефективні модулі пружності, ефективні технічні модулі пружності та ефективний 2D модуль пружності всебічного стиску. В тексті немає пояснення такої відмінності у виборі ефективних параметрів.

Загальні висновки. В цілому дисертаційна робота Стасюка Б. М. є завершеною науковою працею. У дисертації впроваджено та вдосконалено метод граничних елементів для аналізу композитних структур нового класу. Робота пропонує ефективний числовий інструментарій для вирішення складних задач, корисних для наукових досліджень та інженерної практики.

Текст дисертації та автореферату викладено на відповідному науковому та літературному рівні й подано відповідно до вимог для дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук. Загальні висновки роботи повністю відображають досягнення її цілей.

Дисертаційна робота «Гранично-елементний аналіз пружних властивостей тривимірних композитних структур з неканонічними включеннями та дефектами» за актуальністю, науковою новизною, обсягом, теоретичним значенням та прикладною цінністю отриманих результатів, повнотою їх викладу в журнальних публікаціях та апробацією цілком відповідає вимогам пп. 10, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013р., № 567 (зі змінами і доповненнями) до докторських дисертацій, а її автор – Стасюк Богдан Мирославович – заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Декан факультету прикладної математики та інформатики
Львівського національного університету імені Івана Франка,
доктор фізико-математичних наук, професор



Іван ДИЯК