

## 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 дисертації та її зв'язок з державними науковими програмами.**

Інноваційні технології в машинобудуванні, будівництві та інших галузях техніки часто пов'язані з запровадженням у практику сучасних композитних матеріалів, що дозволяють забезпечувати високу функціональність інженерних конструкцій різноманітного призначення. Бажані властивості композитів досягаються ефективною комбінацією їх складових компонент, формою та концентрацією наповнювачів (армуючих елементів), які можуть являти собою як неklasично-об'ємні, зокрема, волокнисті структури скінченного розміру, так і тонкостінні включення. У багатьох практичних застосуваннях слід передбачати також фактор армування сучасних композитних систем включеннями нанорозмірного масштабу.

В процесі виготовлення та подальшої експлуатації композитів, як правило, не вдається уникнути появи в них поверхневих і внутрішніх дефектів. Такі дефекти можуть локалізуватись на міжфазних поверхнях як результат недосконалого зчеплення (адгезії), відшарування, розрихлення чи дифузійного проникнення матеріалів на поверхнях їх поділу. Матричні і волоконні тріщини зароджуються внаслідок часткового пошкодження матеріалу або передруйнівних процесів. Нетрадиційні форми включень, особливості міжфазних поверхонь та тріщиноподібні дефекти зумовлюють специфічний розподіл пружних полів у композитних тілах з впливом на концентрацію напружень в околі неоднорідностей. При цьому важливою є можливість зміцнення композитної структури за рахунок взаємодії множинних наповнювачів та досягнення її анізотропії у макроскопічному сенсі. З'ясування таких закономірностей є актуальним для проектування нових композитних матеріалів із унікальними механічними властивостями, зокрема, підвищеною міцністю, довговічністю та опірністю руйнуванню.

Для всебічного вивчення пружних властивостей композитних тіл і середовищ необхідно володіти ефективними методами дослідження відповідних задач механіки деформівного твердого тіла. Сфера застосування цих методів має охоплювати якомога ширший клас матеріальних компонент композитів, забезпечувати аналіз впливу на їх напружено-деформований стан тіл поодиноких, множинних і розподілених включень загальної форми і нанорозміру, а також враховувати тривимірність навантажень. Як правило, такий спектр вимог реалізується шляхом залучення до аналізу числових методів, серед яких найбільше розповсюдження наразі отримав метод скінчених елементів. Однак його алгоритми ускладнюються у випадку розривів полів на міжфазних та тонкостінних поверхнях та для віддалених від включень навантажень, наприклад у безмежній матриці. Щодо методу граничних елементів як альтернативного числового методу, то сфера його застосування до аналізу неоднорідних тіл обмежувався досі переважно розглядом двовимірних задач. Перенесення цього методу на тривимірні розв'язки для тіл з взаємодіючими включеннями (в тому числі нановключеннями) і різнорідними дефектами не є формальним і потребувало адаптованих до контактних умов постановок задач в гранично-інтегральній формі і схем апроксимації величин на поверхнях просторової конфігурації.

Враховуючи зазначене вище, розглянута дисертаційна робота, в якій виконано граничноелементне дослідження механічної поведінки пружних композитних тіл і середовищ, які характеризуються присутністю неканонічно-об'ємних, тонкостінних та нанорозмірних включень, а також тріщиноподібних дефектів різної в плані форми є **актуальною як з теоретичної, так і практичної точок зору.**

Робота виконана за тематикою досліджень, що проводились в рамках держбюджетних тем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України та Національного університету «Львівська політехніка». Значимість предмету досліджень підкріплена також участю дисертанта як відповідального виконавця у виконанні конкурсних грантових міжнародних наукових проектів.

#### **Наукова новизна дисертаційної роботи.**

Оригінальність результатів, отриманих в роботі, та її новизна визначається як розробленим в ній інструментарієм числового дослідження, так і розв'язанням нового класу тривимірних статичних задач механіки композит-

них матеріалів з пружними компонентами з виявленням та аналізом загальних практично важливих закономірностей їх реакції на навантаження та деформації.

У рамках теорії потенціалів у роботі отримано системи граничних інтегральних рівнянь для міжфазних польових величин у матриці з включенням, клас поверхонь якого обмежений тільки гладкістю. Виходячи з граничних переходів у інтегральних поданнях переміщень для внутрішньої і зовнішньої задач, вибудовано універсальну схему замикання цих систем рівнянь умовами контакту складових композитного матеріалу. Такий підхід реалізовано як щодо досконалого контакту матриці з включенням, так і щодо умов зі стрибками переміщень на міжфазній поверхні від проковзування чи тонкого прошарку. В останньому варіанті контакту використана трансформація до інтегральних рівнянь з невідомими, заданими у глобальній і локальній системах координат.

З метою забезпечення числових розрахунків запропоновано двоетапне зведення інтегральних рівнянь до регулярної форми. Перший етап переходу від сингулярних до слабосингулярних рівнянь базується на відомих у літературі результатах пониження сингулярності шляхом залучення узагальнених інтегралів Гауса. На другому етапі з уникнення у рівняннях також і полярних особливостей, використано властивості спеціальних неафінних відображень граничних елементів, сітками яких покривається міжфазна поверхня. Як результат, методом колокацій отримано граничноелементні дискретні аналоги рівнянь, які допускають обчислення коефіцієнтів матриць відповідних систем лінійних алгебраїчних рівнянь стандартними квадратурами.

Методологічну новизну роботи становить розробка граничноелементних алгоритмів розв'язку стосовно систем інтегральних рівнянь дуального типу, які виникають при дослідженні тривимірних задач для необмежених і обмежених тіл, що містять множинні включення, порожнини і тріщини. Тоді дискретизація рівнянь у переміщеннях в областях міжфазних поверхонь об'ємних включень та тонкостінних жорстких включень доповнюється регуляризаційними і дискретизаційними процедурами щодо рівнянь у напруженнях в областях розташування тонкостінних податливих включень та тріщин. Оригінальним також є врахування взаємодії включень односторонніми впливами, що привело до розщеплення дискретних граничноелементних аналогів рівнянь, а відтак ефективності розрахунків для великої кількості включень.

Результати роботи вирізняються поширенням на клас тривимірних композитів з нанорозмірними включеннями у сенсі прояву матеріальності їх поверхонь. Тут автор стоїть на позиції поєднання граничноелементного алгоритму дискретизації з скінченнорізницеvim стосовно диференціальних рівнянь деформування таких поверхонь на узгоджених граничноелементній та скінченнорізницеvій сітках.

Автором вперше дається спосіб залучення граничноелементних розв'язків у тривимірні задачі з оцінки ефективних пружних властивостей композитів (в тому числі нанокompозитів) за схемою гомогенізації Морі-Танаки. Тоді, у тривимірному випадку з розподіленими скінченними волокнами, матриці впливу у гомогенізаційних співвідношеннях визначаються числовими розв'язками для шістьох видів навантажень розтягу і зсуву репрезентативного елемента структури. Описано розрахунок додаткових матриць впливу від урахування стрибків переміщень на міжфазних поверхнях з ковзним контактом складових та стрибків напружень на матеріальних наноповерхнях.

Новими актуальними задачами, розв'язаними в роботі, є визначення і порівняльний аналіз розподілів переміщень і напружень, концентрації напружень у безмежній матриці з ідеально та неідеально сконтактованим циліндричним волокном скінченної довжини та нанорозміру, тріщинами, розташованими як у матриці, так і у наповнювачі композитів (матричні і волоконні тріщини), системами контрастних за жорсткістю тонкостінних включень, також у обмежених циліндричних і призматичних тілах з тонкостінними включеннями і тріщинами. Проведено обчислення ефективних модулів пружності композитних середовищ з розподіленими волокнами скінченного розміру, включно з ефектами міжфазного проковзування чи власної матеріальності на нанорівні. Розглянуто ситуації з досягненням макроскопічної ізотропії та анізотропії у пружних властивостях композиту, також його нанозміцнення від поверхневого натягу.

У сукупності вказані результати у повній мірі підтверджують новизну дисертаційної роботи.

### **Обґрунтованість і достовірність результатів дисертації.**

Усі наукові результати і висновки дисертаційної роботи достатньо повно обґрунтовані внаслідок використання засадничих положень теорії пружності, застосуванням на стадії інтегрального формулювання задач матема-

тично строгих співвідношень теореми взаємності робіт, граничних значень пружних потенціалів з класичними фундаментальними розв'язками у ролі ядер та коректних інтерпретацій сингулярностей, а на стадії їх граничноелементного числового розв'язання – розвинень за канонічними системами функцій форми та апроксимаційних функцій, а також компактних триангуляцій і квадриангуляцій областей дискретизації. Нанорівневий числовий аналіз аргументується залученням підтвердженої експериментально мембранної моделі матеріальних поверхонь з власною пружністю і натягом, а у випадку гомогенізації середовищ - теорем про усереднені напруження та деформації, а також загальноприйнятої концепції «зовнішнього спостереження» для випадків недосконалого контакту компонентів. Обґрунтованість механічних висновків пояснюється їх зрозумілою класифікацією щодо факторів впливу з вивченням споріднених за суттю закономірностей.

Вірогідність результатів обчислень забезпечується перевіркою їх точності шляхом числового експерименту на альтернативних типах та за згущення граничноелементних сіток, збігом окремих розв'язків, зокрема, при розгляді сферичних включень, із відомими у літературі, одержаними аналітично, та при розгляді випадку концентрації однорідно розподілених скінченних волокон, співставної з їх періодичним розподілом, - з відомими з літератури результатами, отриманими із застосування методу скінченних елементів. Показовим результатом роботи у цьому напрямку є також проведений натурний експеримент щодо макродеформування фібробетону, яким підтверджено дані числової граничноелементної симуляції.

#### **Повнота викладу в опублікованих працях.**

Наукові результати, що складають зміст дисертаційної роботи, повно відображені у достатній кількості публікацій дисертанта у наукових журналах, які є фаховими з механіки деформівного твердого тіла. Серед вказаних публікацій 10 статей у англійських і перевідних міжнародних журналах за профілем роботи, зокрема у передових щодо висвітлення результатів дослідження композитних структур журналах "Theoretical and Applied Fracture Mechanics", "International Applied Mechanics" та "Mechanics of Composite Materials". Основні результати роботи отримані автором самостійно, апробовані на проблемних наукових семінарах, вітчизняних та міжнародних конференціях і симпозіумах з механіки деформівного твердого тіла та механіки композитів.

### **Важливість для науки та практична цінність.**

Отримані у роботі теоретичні результати, включно з даними обчислень та виявленими закономірностями, є суттєвим внеском у теорію деформування композитних середовищ і структурну механіку. Запропоновані формулювання і алгоритми методу граничних елементів не накладають обмежень на просторову форму, взаємне розташування і орієнтацію включень, а значить придатні для загального числового аналізу впливу внутрішньої структуризації на механічні властивості композитів. Область застосування розробленої числової техніки охоплює також параметризацію реакції композитів на зміну якості контакту компонентів і присутність тріщин, що важливо для оцінки їх міцності. Невід'ємною частиною застосованого в роботі граничноелементного підходу є його програмне забезпечення, яке слід сприймати як потужний засіб розрахунків в технологіях проектування композитів і нанокompозитів із заданими характеристиками.

Слід також зауважити, що викладені в роботі підходи та методи мають перспективу узагальнення на задачі термопружності та динаміки композитів.

Попри відзначені здобутки, щодо роботи можна зробити такі **зауваження** та побажання:

1. У задачах для необмежених матеріалів із системами включень, порожнин та тріщин, а також при розташуванні вказаних об'єктів поблизу зовнішніх поверхонь у обмежених тілах, важливим є оцінювання впливу відносних відстаней між об'єктами взаємодії на параметри напружено-деформованого стану композитів, їх ефективні модулі пружності та коефіцієнти інтенсивності напружень біля контурів тріщин. Доцільною є також перевірка придатності запропонованого методу розрахунків за умов зближення цих об'єктів між собою чи з граничними поверхнями. Тому присвячені даній проблематиці розділи дисертаційної роботи були б повнішими при окремому аналізі вказаного параметра взаємодії.
2. Загальність запропонованого методу досліджень композитних тіл, армованих короткими волокнами неканонічної форми, забезпечується можливістю розгляду різноспрямованих щодо волокон навантажень. Однак більшість наведених в роботі числових результатів стосується розтягу вздовж осі волокон. Цікавим було б вивчення реакції таких композитних тіл на комбіновані навантаження розтягу-стиску.

3. При представленні в рефераті дисертації числових результатів дослідження композитів, що містять тріщини та тонкостінні включення, автором використовується термін «нормовані коефіцієнти інтенсивності напружень», однак при цьому не наводиться роз'яснення щодо того, на які величини здійснюється нормування КІН.
4. При розгляді в тексті дисертації задач для середовищ з нанорозмірними включеннями і порожнинами у вигляді волокон скінченних розмірів автор прив'язується до розміру їх поперечного перерізу, однак можна було використати в якості відлікового параметра нановидовження волокна. У роботі відсутні міркування з цього приводу.
5. У роботі лише обтічно описано числове врахування умов узгодження деформування сферичної і циліндричної частин нанорозмірного волокна. Також це стосується уникнення у дискретному аналогові особливості у вершині нановолокна, пов'язаної із введенням сферичної системи координат.

Слід при цьому зазначити, що вказані **зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.**

#### **Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.**

В цілому, вважаю дисертаційну роботу Стасюка Богдана Мирославовича цілісним та завершеним дослідженням, в якому вирішена нова і важлива наукова проблема з числового дослідження пружних властивостей тривимірних композитів з некласичними за формою і розмірами наповнювачами і дефектами структури. Текст дисертації оформлено згідно з чинними вимогами, виклад змісту чітко структуровано та подано на належному науковому рівні. Реферат дисертації цілком відповідає змісту дисертаційної роботи та в повній мірі відображає її основні положення.

За обсягом виконаних досліджень, новизною отриманих результатів, їх теоретичним та практичним значенням дисертаційна робота на тему „Гранично-елементний аналіз пружних властивостей тривимірних композитних структур з неканонічними включеннями та дефектами” відповідає вимогам пунктів 10 та 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами і доповненнями) щодо дисертацій, які подаються на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, а її автор, Стасюк Богдан Мирославович,

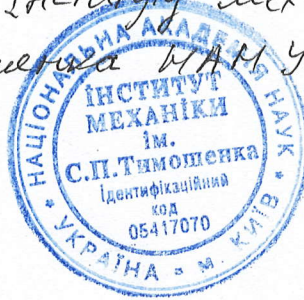
заслуговеє присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук із цієї спеціальності.

Офіційний опонент,  
завідувач відділу динаміки та стійкості суцільних середовищ  
Інституту механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
академік НАН України



В.Л. Богданов

Підпис В.Л. Богданова засвідчую.  
Вг. секретар Інституту механіки  
ім. С.П. Тимошенка НАН України  
д.т.н.



Юрій Скосяренко