

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 із науковими програмами.

Сучасний світ можна, окрім іншого, охарактеризувати як світ композитних матеріалів. Їх практичне застосування зростає з кожним роком завдяки вищій міцності, кращій стійкості до пошкоджень та втомі у порівнянні з традиційними матеріалами. Важливим етапом у виробництві композитних матеріалів є проектування, коли кінцеві бажані властивості матеріалу плануються на основі характеристик його компонент. Створення нових композитних структур з необхідними фізико-хімічними властивостями відбувається переважно експериментальним способом. Фундаментальні теорії забезпечують якісну оцінку і дозволяють параметризувати розрахунки як локальних, так і глобальних характеристик композитів, тому розробка надійних методів прогнозування механічної поведінки композитів є актуальною сферою наукових досліджень.

Ключову роль у пружних структурованих матеріалах, зокрема новітніх нанокомпозитах, відіграє як індивідуальна форма включень, так і геометрія наповнення ними матричного середовища. На мікрорівні важливе значення має також якість контакту компонент тіла внаслідок зростання дольової частки площі міжфазної поверхні стосовно обмеженого нею об'єму. На практиці, внаслідок виробничих чи природних процесів, внутрішня архітектура таких матеріалів ускладнюється, на скомпоновані пружні системи можуть діяти навантаження, які спричиняють появу небажаних дефектів. Як правило, основним фактором зменшення міцності елементів конструкцій в процесі їх експлуатації виступає концентрація напружень в околі тріщин. Теоретичні розв'язки важливої для механіки крихкого руйнування проблеми у випадку перебування тріщин в однорідному безмежному або півбезмежному тілі досить добре представлені в літературі. Якщо ж розглядається випадок гетерогенного тіла з тріщиною, то врахування взаємодії між нею та включеннями є обов'язковим елементом точного розрахунку на міцність. Виключно важливо знати зміну поля напружень всередині включення від наявності у ньому тріщини для встановлення умов локального руйнування тіла. Щодо деформування композитів у цілісному прояві, то показовими тут є

ефективні модулі пружності із їх виразною залежністю від внутрішньої структури.

Для виявлення ефектів описаного структурування матеріалів необхідно володіти загальними методами розв'язування статичних задач теорії пружності, які б враховували неklasичну форму та спеціальні фізичні і контактні особливості наповнювачів, їх множинність та впорядкованість чи випадковість орієнтування. На створення відповідного числового апарату на основі методу граничних елементів спрямована дана робота.

За своїм науковим спрямуванням дисертаційна робота відповідає Плану наукових досліджень НАН України та Міністерства освіти і науки України. Розвиток поставлених в дисертаційній роботі наукових проблем пов'язаний з виконанням бюджетних тем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. Окремі наукові результати отримані за підтримки міжнародних наукових грантів. З огляду на це дана дисертаційна робота є, без сумніву, актуальною як у науковому, так і в прикладному аспектах.

Наукова новизна дисертаційної роботи. Основні результати, що складають наукову новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

- забезпеченні методу граничних елементів інтегральними формулюваннями тривимірних задач для широкого класу пружних композитних систем, а саме: «безмежна матриця-об'ємисте включення»; «безмежна матриця – об'ємисте включення з внутрішньою щодо нього тріщиною»; «безмежна матриця – масив об'ємистих і тонкостінних включень та матричних тріщин»; «обмежена матриця – масив тонкостінних включень та тріщин»;
- узагальненні інтегральних формулювань на різні типи контакту між матрицею і об'ємистим включенням, а саме: ковзного, через тонкий прошарок та поверхню з нанорівневою власною пружністю і натягом;
- приведенні отриманих інтегральних рівнянь до регулярних форм, які дозволяють їх граничноелементне числове розв'язання через квадратури;
- використанні граничноелементних розв'язків як структурних частин в дослідженні ефективних модулів пружності волокнистих композитів і нанокомпозитів;
- числовому дослідженні закономірностей передачі переміщень і напружень через міжфазні поверхні з різною якістю контакту прилеглих компонент, впливу на концентрацію напружень взаємодії

- волокнистих включень і тріщин, розміру і поверхневого натягу нановолокон;
- перенесенні числового аналізу на ефективні модулі пружності композитів у залежності від орієнтації та контакту у матричному середовищі розподілених скінченних волокон, специфіки матеріальних поверхонь та розміру нановолокон і нанопор.

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертації. На всіх етапах дослідження автор належну увагу приділяв з'ясуванню суті і вірогідності отриманих результатів. Ним строго витримані математичні формулювання задач, в основу яких покладено класичні співвідношення механіки деформівного твердого тіла. Математично грамотно здійснено усі аналітичні перетворення. Коректно використано аналітичні та числові методи розв'язування задач, а також проілюстровано збіг результатів, отриманих в окремих випадках альтернативними методами або з відомими у літературі. Як додатковий тест для числових результатів, проведено їх співставлення з даними проведеного експерименту. Подані у роботі аналітичні та графічні залежності цілком адекватно відображають механічний та фізичний сенс досліджуваних явищ та процесів. Якість висновків забезпечена детальним порівняльним аналізом, виходячи із можливості маніпуляції у розрахунках вхідних геометричних і матеріальних параметрів розглянутих систем.

Загальна характеристика дисертаційної роботи. Дисертація Стасюка Б.М, яка складається із вступу, семи розділів, висновків та переліку джерел є цілісною та завершеною науково-дослідною роботою, у якій отримані нові важливі результати, що мають фундаментальне та прикладне значення.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, окреслено предмет і об'єкт дослідження, зазначено новизну, теоретичне значення та практичну цінність одержаних результатів.

У *першому розділі* висвітлено стан розроблення проблеми, розв'язанню якої присвячена дисертація. Аналіз стосується публікацій у вітчизняних та зарубіжних джерелах. Велика увага приділена аналітичним та числовим методам розв'язання задач теорії пружності для матриць з неоднорідностями. Зазначено, що лише обмежене число робіт із теоретичного аналізу статичної поведінки пружної матриці із тривимірними множинними включеннями відображено у літературі, де для отримання результатів послуговуються аналітично-числовими методами.

У *другому* розділі отримано гранично-інтегральні формулювання тривимірних статичних задач для пружної матриці із об'ємним пружним включенням загальної форми за умов неперервності переміщень та напружень на межі їх контакту. Викладено схему регуляризації сингулярних ядер отриманих граничних інтегральних рівнянь до процедури їх дискретизації та післядискретизаційну регуляризацію слабосингулярних ядер. На основі гранично-елементного розбиття міжфазної поверхні та використання інтерполяційних функцій наближення міжфазних переміщень та зусиль побудовано дискретний аналог інтегральних рівнянь у вигляді систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Шляхом числового експерименту продемонстровано достовірність числових розрахунків напружено-деформованого стану розглянутих композитних тіл, отриманого із застосуванням запропонованого алгоритму. Числово досліджено розподіл напружень у викривлених волокнах сфероциліндричної форми у залежності від їх видовження, викривлення, комбінації матеріалів у системі та за однорідного розтягу матриці на безмежності. У серединному перерізі волокон із фіксованою видовженістю виявлено, що розподіл нормальних напружень володіє точкою інваріантності щодо кривини викривлення волокон.

Третій розділ дисертації присвячено тривимірним задачам взаємодії пружної матриці із скінченною кількістю об'ємних та плоских тонкостінних включень і тріщин (як матричних так і волоконних). Граничноелементні схеми узагальнено на числове розв'язання інтегральних рівнянь дуального типу (у переміщеннях і напруженнях), якими описується взаємодія включень та тріщин. Числово досліджено вплив сфероциліндричного волокна на коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) в околі тріщини, яка розташована або у матриці, або у волокні. Виявлено довжину волокна та його відстань до тріщини, за зростання яких відсутня зміна КІН. Взаємодія тріщини з різними за формою та жорсткістю дисковими включеннями приводить до складної поведінки КІН вздовж фронту тріщини.

У *четвертому* розділі методика досліджень, описана у третьому розділі, перенесена на числовий аналіз напружено-деформованого стану у обмеженому пружному тілі із скінченим числом тонких податливих включень і тріщин. Проведено числовий розрахунок КІН відриву за взаємодії двох тонких включень, розташованих, перпендикулярно до площини серединного перерізу порожнистого циліндра, що перебуває під дією внутрішнього тиску. У аналогічному, практично важливому випадку порожнистого циліндра із круговою або еліптичною тріщинами виявлено випадки зменшення КІН в їх околі за рахунок додаткового тиску на зовнішній поверхні циліндра.

У *п'ятому* розділі дисертації гранично-елементний аналіз поширено на задачі за неідеального контакту між матрицею та включенням.

Розглянуто випадки проковзування та присутності міжфазного тонкого податливого прошарку. Числові дослідження напружено-деформованого стану пружної матриці за її всебічного стиску виявили, що як проковзування так і прошарок між матрицею і сфероциліндричним волокном є факторами зниження напружень вздовж осі волокна.

Шостий розділ дисертації присвячено аналізу ефективних пружних модулів двофазних матричних композитів з коротковолокнистими наповнювачами. Поєднання гомогенізаційних співвідношень Морі-Танаки та гранично-елементних розв'язків для репрезентативного елемента середовища дозволили побудувати ефективний числовий алгоритм дослідження пружних властивостей композиту. Достовірність числових результатів підтверджена експериментально.

У *сьомому* розділі дисертації метод граничних інтегральних рівнянь адаптовано для визначення локальних та ефективних пружних властивостей композитних тіл з нанорозмірними включеннями або порожнинами. Це досягається поєднанням граничних інтегральних рівнянь, визначених на міжфазній поверхні, з диференціальними рівняннями нанорівневої мембранної моделі цієї поверхні як компоненти з власною пружністю та натягом. Числові результати стосуються нановключення (нанопорожнини) у формі сфероциліндричного волокна (нанотрубки) за умов їх поверхневого натягу, а також однакової та випадкової орієнтацій розподілених наповнювачів такого типу у нанокомпозиті (нанопористому середовищі).

Цінність отриманих результатів для науки і практики. Запропоновані у роботі підходи вагомо розширюють і доповнюють відомі математичні методи розв'язування задач теорії пружності для неоднорідних тіл. Значення запропонованих досліджень для науки і практики полягає у математичному моделюванні та описі поведінки матричних композитів з множинними включеннями за різнопланового статичного навантаження. Важливим є встановлення впливу локальної структури композитів на їх усереднені властивості на макроскопічному рівні. Отримані гранично-інтегральні формулювання та граничноелементні розв'язки задач, програмні продукти є теоретико-обчислювальною базою для аналізу міцності композитних елементів конструкцій, застосовні в технологіях дизайну та продукування матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями. Зокрема, із ударозахисними функціями на основі нановолокнистих армувальних елементів і фібробетону.

Щодо роботи варто зробити такі **зауваження**.

1. У роботі запроваджене повне внесення умов контакту складових розглянутих композитних тіл у інтегральні подання розв'язків та

граничні інтегральні рівняння задач, за винятком контакту через матеріальну поверхню, коли рівняння на стрибки напружень на цій поверхні розглядаються як доповняльні. Відхід від загальної концепції вимагає глибшої аргументації.

2. Задачі взаємодії тріщин із волокнами і тонкостінними включеннями у матриці сформульовано у загальній постановці щодо розташування об'єктів і орієнтації навантажень. Однак, числове дослідження проведено для симетричних задач з впливом такої взаємодії лише на коефіцієнти інтенсивності напружень першої моди (відриву).
3. Оскільки результати дисертації пов'язані із числовими розрахунками складних тривимірних пружних систем, було б корисним навести дані про використане алгоритмічне середовище кодування та оперативний час виконання програм у залежності від вхідних конфігурацій задач.

Наведені зауваження не применшують високий рівень дисертації, та не є принциповими щодо обґрунтованості і повноти її результатів і висновків.

Загальний висновок.

Дисертація Стасюка Б.М є глибоко теоретичною, цілісною та завершеною роботою, у якій отримані нові важливі результати, що мають фундаментальне та прикладне значення. Поставлена автором мета дослідження цілком досягнута. Робота виконана на високому науковому рівні із залученням сучасного математичного апарату та комп'ютерної техніки.

Дисертаційна робота достатньо добре структурована, акуратно оформлена, наочно та повно проілюстрована графіками різних механічних величин та параметрів, які важливі для практики. Основні результати, викладені в роботі, широко обговорені на конференціях і семінарах з механіки деформівного твердого тіла, достатньо повно відображені в опублікованих наукових працях у міжнародних та вітчизняних виданнях (з них 16 публікацій – у фахових виданнях, що відповідають вимогам МОН України, у тому числі авторитетних зарубіжних журналах). Автореферат дисертації правильно і з достатньою мірою повноти відображає загальну характеристику, зміст та висновки дисертації.

Вважаю, що подана до захисту дисертація відповідає усім вимогам, які ставляться до докторських дисертацій, а її автор, Стасюк Богдан Мирославович, за розв'язання важливої наукової проблеми з розроблення граничноелементних підходів до числового дослідження тривимірного напружено-деформованого стану композитних тіл і ефективних модулів

пружності композитних середовищ з об'ємисто-неканонічними, тонкостінними і нанорозмірними включеннями та впливу на механічні властивості таких структур взаємодії включень, внутрішніх тріщин і недосконалостей міжфазного контакту заслуговує здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Офіційний опонент –

завідувач кафедри прикладної математики і фізики
Української академії друкарства МОН України,
доктор фіз-мат. наук, професор



Й.З. Піскозуб

Підпис *Піскозуба Й.З.*
Завіряю *28.05.2014*
Начальник ВК УАД

