

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Піскозуба Йосифа Збігневича

«Структурно-модульний метод функцій стрібка дослідження деформування біматеріалів з тріщинами і фізично нелінійними тонкими включеннями»,

що представлена на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук за спеціальністю

01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертації

Тонкі неоднорідності різного походження, зокрема, армуючі стрічки чи волокна композитів, тріщини, оксидні плівки, сульфідні та графітові включення в металах, заповнені газом, рідиною чи твердою субстанцією порожнини, є одним із найпоширеніших типів неоднорідності будови матеріалів, що або зумовлюють небажану високу концентрацію напружень і, відповідно, знижують надійність та експлуатаційні характеристики виробів, або слугують підкріплювальними елементами, що оптимізують напружене-деформований стан тіл для певного виду навантажень. Особливої уваги в сучасній техніці та технологіях набувають також мікро та нано елементні структури у таких галузях, як мікроелектроніка, біотехнології, енергетика, озброєння тощо. Серед найбільш перспективних наукових проектів експерти називають значне підвищення продуктивності комп'ютерів, відновлення людських органів з використанням відтворених тканин, отримання нових матеріалів, створених безпосередньо із заданих молекул та атомів тощо. Існує певна складність математичного моделювання механіки таких структур, яка все ще залишається гостро актуальною проблемою теорії матеріалознавства. На даному етапі розвитку теорії можна зосередитися на конструкуванні придатних для вивчення різномасштабних структур ускладнених конститутивних рівнянь та опрацювання методів їхнього розв'язування.

Особливе значення в даний час мають контактні задачі для неоднорідних середовищ, таких як, наприклад, композити, коли зміна механічних властивостей по одній з координат може бути нелінійною. Поведінка і вплив включень всередині структурованих матеріалів є основним предметом у їх інженерному проектуванні. Порушення контакту між складовими елементами композитів (поява тріщин, втрата адгезії, фрикційне проковзування, поява поверхневих енергій тощо) також можуть істотно змінити експлуатаційні властивості конструкцій з них, а це вимагає вивчення впливу таких явищ на розподіл напружень та деформацій. Для теоретичного вивчення деформування структур з тонкостінними компонентами або неоднорідностями необхідно оперувати ефективними моделями та методами дослідження відповідних задач механіки деформівного твердого тіла.

Щодо формулувань відповідних задач з урахуванням фізико-механічної нелінійності тонких включень чи їх неідеального контактування з матрицею, то відомі у літературі розв'язки стосуються лише задач механіки налягаючих тріщин чи задач з відомою наперед зоною проковзування та окремих доволі вузьких класів тонких прошарків та відшарувань. На часі стоять важлива й математично складна проблема опрацювання загальних підходів та методів розв'язування задач для аналізу складних композитних систем з некласичними структурними елементами. Відтак запропонована до захисту дисертаційна робота з математичного моделювання та аналітико-числового дослідження поводження композитних тіл, які характеризуються присутністю тонких міжфазних фізично нелінійних неоднорідностей, які можуть

неідеально контактувати з тілом є актуальною з погляду як розвитку теорії тонких неоднорідностей, так можливостей практичного використання.

Робота виконана за тематикою досліджень, що проводились в рамках держбюджетних тем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України та Української академії друкарства МОН України.

Ступінь обґрутованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі та достовірність наукових положень і висновків

Усі наукові результати і висновки дисертаційної роботи належно і повно обґрутовані. Їх вірогідність результатів обчислень забезпечені перевіркою їх практичної точності у числових експериментах спрямованих на окреслення достатніх параметрів редукції результатуючих безмежних систем лінійних алгебричних рівнянь; аналізом збіжності побудованих інкрементально-ітераційних алгоритмів та збігом окремих результатів із відомими у літературі, що були отримані іншими методами.

Достовірність наукових положень і висновків забезпечується коректним застосуванням математичного апарату й використанням відомих визначальних положень механіки деформівного твердого тіла; контрольним розв'язуванням вивчених іншими дослідниками задач; співставленням і узгодженням деяких часткових результатів із вже відомими розв'язками інших авторів.

До найважливіших результатів дисертаційного дослідження, які визначають наукову новизну результатів досліджень та їх теоретичне значення слід віднести такі:

- розроблено структурно-модульний метод функцій стрибка, як цілісний комплекс засобів аналітико-числового розв'язування двовимірних задач пружності для ізотропних біматеріалів із тонкими твердими структурно неоднорідними лінійно чи нелінійно деформівними міжфазними включеннями;
- побудовано універсальні математичні моделі тонких структурно-неоднорідних лінійно та нелінійно пружних, пружнопластичних неоднорідностей з урахуванням істотних фізичних механізмів їхнього деформування;
- розроблено синтезовані математичні моделі тонких неоднорідностей, в т.ч. багатошарових, що враховують можливості їхнього неідеального контакту із середовищем (фрикційне проявлення) та наявності спричинених поверхневою енергією на межі поділу матеріалів додаткових поверхневих напружень;
- отримано країові інтегральні подання полів напружень та деформацій у матриці за умов комплексного довільного силового та дислокаційного квазістатичного багатокрокового навантажування-розвантажування, що враховують наявність тонких включень;
- записано системи інтегральних рівнянь країових задач для біматеріалів із міжфазними чутливими до впливу механічних полів тонкими неоднорідностями (тріщинами, включеннями);
- для розв'язування нелінійних задач фрикційного проковзування в умовах багатокрокового навантажування-розвантажування застосовано інкрементальний підхід;
- отримано асимптотичні співвідношення, що описують розподіл полів напружень і переміщень поблизу вершин тонкого міжфазного включення в кусково-однорідній матриці;

Це дало можливість автору розв'язати цим методом цілий клас нових задач для пружних композитних тіл з фізично нелінійними та шаруватими тонкостінними неоднорідностями та виявити і глибоко дослідити загальні практично важливі закономірності поведінки таких мікроструктур в умовах різних типів та різноманітних режимів навантажування, в тому числі багатокрокового чи циклічного.

Практичне та теоретичне значення отриманих результатів полягає у виявленні закономірностей деформування біматеріальних структур з тонкими фізично нелінійними прошарками, які можна застосувати із єдиних позицій як у теорії композитів в рамках мезо- чи

мікромеханіки, так і в наномеханіці чи геомеханіці, мікроелектроніці, механіці руйнування, матеріалознавстві тощо. Розроблений автором структурно-модульний метод функцій стрибка у поєднанні з інкрементально-ітераційним алгоритмом розв'язування задач з фізичними чи геометричними нелінійностями властивостей дає можливість високоточного аналізу напруженого стану тіл із тонкими неоднорідностями в умовах довільного силового чи дислокаційного багатокрокового навантаження.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел із 479 найменувань на 40 сторінках та 2 додатків на 14 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 390 сторінок, з них 312 сторінок основного тексту, 144 рисунки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та основні завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, розкрито наукову новизну та практична цінність одержаних результатів роботи, зазначено методи дослідження, проаналізовано достовірність отриманих результатів та їхнє теоретичне та практичне значення. Подано інформацію про апробацію результатів, публікації та загальну структуру дисертації.

У **першому** розділі зроблено огляд наукових праць, що стосуються проблематики задач поздовжнього зсуву пружних тіл із тонкостінними елементами структури. Проаналізовано переваги й недоліки застосування відомих у літературі методів розв'язування задач механіки композитів, армованих стрічками, а також задач мікро- та наномеханіки для тіл із тонкими неоднорідностями. Особливу увагу зосереджено на врахуванні нелінійних ефектів як фізичної (нелінійна пружність, пружнопластичність та ін.) так і геометричної (неідеальний фрикційний контакт з невідомими апріорі зонами контакту, шарувата будова) природи згаданих тонких неоднорідностей структури матеріалу.

У **другому** розділі описана та обґрунтована концепція запропонованого СММФС для розв'язування задач дослідження деформування біматеріалів з тонкими міжфазними включеннями-прошарками як комплексного об'єднання трьох ідеологічно незалежних модулів, пов'язаних посередництвом функцій впливу: зовнішня задача – визначення НДС матриці в залежності від функцій впливу (стрибків векторів напружень і переміщень) тонкого включення на математичному розрізі, що збігається із серединною поверхнею включення та зовнішнього навантаження; внутрішня задача – побудова математичної моделі тонкого включення-прошарку з нелінійними фізико-механічними властивостями, якою є виявлення зв'язку між функціями впливу на зовнішній поверхні включення та НДС у його поперечних перерізах та проміжкова задача – зв'язок зовнішньої та внутрішньої задач через граничні умови доволі загального вигляду. Крім того, запропоновану методику розв'язування систем сингулярних інтегральних рівнянь 2-го роду зі змінюваними коефіцієнтами та концепцію інкрементально-ітераційного методу розв'язування класів задач із багатокровним навантажуванням-розвантажуванням, невідомою апріорі зоною проковзування на інтерфейсі включення-матриця, нелінійними фізико-механічними властивостями матеріалу включення. .

У **третьому** розділі досліджено квазістатичне багатокровне навантажування-розвантажування стиснутих півпросторів в умовах дотикового контакту. Для даного класу задач отримано аналітичні вирази для всіх компонент НДС матриці, розсіяння енергії внаслідок фрикційного проковзування, узагальнених коефіцієнтів інтенсивності напружень, розмірів зон проковзування, що дозволило проаналізувати їх залежність від різних типів і режимів квазістатичного багатокровного навантажування-розвантажування.

У четвертому розділі отримані в розділі 3 результати узагальнені на випадок, коли фрикційне проковзування півпросторів можливе лише на деяких ділянках системи стиснутих міжфазних тунельних розрізів на інтерфейсі півпросторів за тих самих умов змінюваного багатокрокового навантажування. Розміри цих зон, періодично з'являючись та зростаючи не можуть перевищувати розмірів відповідних заданих апріорі стиснутих розрізів. Виділено три фази розвитку процесу проковзування берегів розрізів поздовжнього зсуву, які відрізняються від згаданих в розділі 3 фаз розвитку процесу проковзування, коли відсутні обмеження на розмір зон проковзування.

У п'ятому розділі досліджено вплив існування додаткових поверхневих напружень на інтерфейсах включення-прошарку з матрицею на параметри біматеріальної структури в цілому, що забезпечило природну можливість перенести методи розв'язування задач макромеханіки для тіл із тонкими прошарками у сферу мікро- та наномеханіки композитів. Для ілюстрації методики дослідження задач такого класу з допомогою СММФС було виконано детальний числовий аналіз впливу на НДС матриці сил натягу як сталих, так і залежних від пружинних властивостей матеріалів. Виявлені у числових розрахунках особливості впливу натягу на НДС у матриці та включені за різного навантаження.

У шостому розділі досліджено вплив на НДС біматеріалу неідеальності будови включення-прошарку в сенсі його багатошаровості. Як окремі випадки досліджено задачі часткового відшарування тонкого ортотропного включення-прошарку у біматеріальній мікроструктурі та поздовжнього зсуву структури у вигляді однорідного тіла із тонким двошаровим різномодульним включенням за умов навантажування силовими чинниками та дислокаціями.

У сьомому розділі СММФС застосовано до розв'язання задачі про деформування тонкого міжфазного включення з нелінійними фізичними властивостями. Запропонованім інкрементально-ітераційним методом досліджено випадки багатокрокового пружно-пластичного деформування включення з матеріалу, підпорядкованого закону Рамберга-Огуда та ідеального пружно-пластичного матеріалу із лінійним зміцненням.

У висновках відтворено основні результати дисертаційного дослідження, що відображають отримані у роботі теоретичні та практичні результати, включно з даними обчислень та виявленими закономірностями, рекомендації щодо їх застосування із єдиних позицій як у теорії композитів в рамках мезо- чи мікромеханіки, так і в наномеханіці, механіці руйнування, матеріалознавстві тощо.

Висновки сформульовано чітко, вони повністю висвітлюють отримані у роботі результати.

Список використаних джерел є інформативним, достатньо повно охоплює предметну область та відображає опрацювання автором значної кількості джерел.

Додатки до роботи є змістовними.

Стиль, обсяг, структура, оформлення матеріалів дисертаційного дослідження та **автореферату** відповідають вимогам «Порядку присудження наукових ступенів» щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук. Дисертаційна робота має логічну структуру. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації.

Основні наукові результати дисертаційної роботи, подані до захисту, опубліковані у необхідному обсязі у періодичних закордонних виданнях, індексованих у наукометричних базах Scopus, WebOfScience, фахових наукових виданнях України, інших наукових виданнях України, а також апробовані на 37 міжнародних та українських наукових конференціях та симпозіумах. Вимоги щодо кількості та якості публікацій виконано.

Зауваження

1. В роботі міститься лише практичне дослідження збіжності числових методів розв'язування інтегральних рівнянь, особливо з урахуванням використання ітераційних алгоритмів. Було б варто дослідити це теоретично.
2. В роботі у розділі 7 розглянуто випадок діаграми деформування включення з ідеального пружно-пластичного матеріалу із лінійним зміщеннем. Проте така діаграма має точку зламу, чи не вплинуло це на точність числових розрахунків в околі цієї точки?
3. У висновках слід було б чіткіше визначити перспективи розвитку подальших досліджень із застосуванням цього ефективного методу.
4. В роботі трапляються граматичні, орфографічні та синтаксичні помилки, неузгодженості відмінків слів.

Але, відзначені зауваження зовсім не загеречують загального позитивного враження від поданої до захисту роботи і не впливають на її головні теоретичні та практичні результати. Дисертаційна робота в цілому відповідає вимогам МОН України до докторських дисертацій.

Загальні висновки

В цілому, вважаю дисертаційну роботу Піскозуба Йосифа Збігнєвича цілісним та завершеним дослідженням, в якій ретельно і математично вивірено вирішена актуальна і складна наукова проблема розробки математичних моделей і методів дослідження механічних полів у біматеріалах з тонкими фізично нелінійними неоднорідностями з урахуванням неідеальності контактної взаємодії елементів структури і впливу поверхневої енергії за довільного типу і режиму квазістатичного навантажування-розвантажування. Сформульована мета дослідження успішно досягнута. Текст автoreферату та дисертації написано дуже добре та оформлено згідно чинних вимог, виклад змісту добре структуровано та викладено на належно високому науковому рівні. Зміст автoreферату цілком відповідає змісту дисертації та повною мірою відображає її основні положення.

За обсягом виконаних досліджень, новизною отриманих результатів, їх теоретичним та практичним значенням дисертаційна робота на тему «Структурно-модульний метод функцій стрибка дослідження деформування біматеріалів з тріщинами і фізично нелінійними тонкими включеннями» беззаперечно відповідає вимогам ДАК МОН України щодо дисертацій, які подаються на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла, а її автор, Піскозуб Йосиф Збігнєвич, заслуговує надання йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук із цієї спеціальності.

Офіційний опонент,

доктор фізико-математичних наук, професор

Вайсфельд Наталія Данилівна,

завідувач кафедри методів математичної фізики

Одеського національного університету імені І.І. Мечникова МОН України

Підпис Вайсфельд Н.Д. за свідчучим
Вчений секретар Одеського національного університету імені І.І. Мечникова МОН України
Канд. хім. наук Ч.Д. Кулако С.В.

