

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Піскозуба Йосифа Збігнєвича** «Структурно-модульний метод функцій стрибка дослідження деформування біматеріалів з тріщинами і фізично нелінійними тонкими включеннями», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертації. Актуальність обраного напрямку досліджень пов'язана із застосуванням в інженерній практиці тонких неоднорідностей різного походження, зокрема, армуючих стрічок чи волокон композитів. Сучасні технології дуже часто вимагають використання нових композиційних матеріалів, які дають можливість поєднувати малу питому вагу з високими параметрами міцності, тривкості, а також є наділені іншими істотно покращеними властивостями. Врахування впливу тонких включень всередині структурованих матеріалів є надзвичайно різнобічним і важливим завданням інженерного проектування і вимагає вдосконалення існуючих та розробки нових методів і достатньо адекватних складних моделей. Це суттєво ускладнює дослідження відповідних задач механіки композитів, мікро- та наномеханіки.

На даний час питання побудови достатньо адекватної деформаційної моделі нелінійного деформування тонких структурних елементів композитів, особливо врахування появи залишкових напружень за різного типу і режимів навантажування/розвантажування, поверхневої енергії і можливого неідеального фрикційного контакту, залишається практично недослідженим.

У зв'язку з цим окреслюється актуальна наукова проблема побудови загального підходу, що дав би можливість досліджувати механіку довільних тонких включень за умов ідеального чи неідеального контакту з єдиних позицій теорії тонких неоднорідностей.

Наукова новизна результатів досліджень обумовлена розробленням цілісного комплексу засобів аналітико-числового розв'язування двовимірних задач пружності для ізотропних біматеріалів із тонкими твердими структурно неоднорідними лінійно чи нелінійно деформівними міжфазними включеннями; універсальних математичних моделей тонких структурно-неоднорідних лінійно та нелінійно пружних, пружнопластичних неоднорідностей, в т.ч. багат шарових, з урахуванням істотних фізичних механізмів їхнього деформування; побудові аналітичних та аналітично-числових розв'язків цілого класу нових задач; розробці математичного апарату та методів для врахування нелінійності у постановці таких задач.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і висновків. Усі наукові результати і висновки дисертаційної роботи є належно і повно обґрунтовані внаслідок використання засадничих положень лінійної та нелінійної теорії пружності, застосування математично вивірених та строгих співвідношень теорії сингулярних інтегральних рівнянь і асимптотичних розвинень за докладно перевіреної у численних числових експериментах

стійкості ітераційних підходів та фіксації меж придатності запропонованих моделей. Вірогідність результатів обчислень забезпечено перевіркою їх практичної точності у числових експериментах спрямованих на окреслення достатніх параметрів редукції результуючих безмежних систем лінійних алгебричних рівнянь; виходом у граничних випадках вже відомих розв'язків відповідних задач; збігом окремих результатів із відомими у літературі, що були отримані іншими методами. Достовірність наукових положень і висновків забезпечується коректною постановкою проблеми та задач дисертаційного дослідження, які розв'язуються логічно, послідовно та аргументовано. Достовірність результатів підтверджується відповідністю методології дослідження поставленій проблемі, фізичною коректністю висновків, повнотою розгляду об'єкта дослідження, застосування методів, адекватних предмету дослідження.

Практичне значення отриманих результатів та можливість їх використання. Дослідження за темою дисертації відповідають основним напрямкам науково-дослідної діяльності Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України і Української академії друкарства МОН України та виконувалися у рамках низки науково-дослідних тем впродовж 2016-2020 р.р. Результати, отримані в дисертаційній роботі, мають вагомим наукове та прикладне значення і можуть використовуватися як у теоретичній сфері при моделюванні та аналізі деформування тіл тонкими стрічкоподібними неоднорідностями довільної фізичної природи, так і для практичних розрахунків та проектування композитів із застосуванням фізико-механічно нелінійних матеріалів в умовах змінюваних навантажень та фрикційного проковзування, а також у наномеханіці з урахуванням поверхневих напружень.

Оцінка основного змісту дисертаційної роботи. Робота складається із анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації складає 390 сторінок (основний текст – 312 сторінок), у тому числі 144 рисунки та список використаних джерел з 479 найменувань (кириличні – 275, латиниця – 204).

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та основні завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне значення та практичну цінність одержаних результатів, 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. Ґрунтовно проаналізовано переваги й недоліки застосування відомих у літературі методів розв'язування задач механіки армованих стрічками композитів, а також задач мікро- та наномеханіки для тіл з тонкими неоднорідностями (тріщинами, пружними включеннями). Окремо

увагу зосереджено на врахуванні нелінійних ефектів як фізичної так і структурної (неідеальний фрикційний контакт з невідомими апіорі зонами контакту, шарувата будова) природи згаданих тонких неоднорідностей структури матеріалу.

У *другому* розділі, який можна вважати ключовим розділом роботи, описана та обґрунтована концепція запропонованого структурно-модульного методу функцій стрибка (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: 1) 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; 2) Внутрішня задача побудова математичної моделі тонкого включення-прошарку з нелійними фізико-механічними властивостями, якою є виявлення зв'язку між функціями впливу на зовнішній поверхні включення та НДС у його поперечних перерізах; 3) Проміжна задача, як зв'язок функцій впливу зовнішньої та внутрішньої задач у вигляді узагальнених умов неідеального контакту. Також запропоновано методику розв'язування систем сингулярних інтегральних рівнянь 2-го роду зі змінюваними коефіцієнтами та описано концепцію інкрементально-ітераційного методу розв'язування класів задач із багатокроковим навантажуванням-розвантажуванням, невідомою апіорі зоною проковзування на інтерфейсі включення-матриця, нелійними фізико-механічними властивостями матеріалу включення.

У *третьому* розділі досліджено квазістатичне багатокрокове навантажування-розвантажування стиснутих півпросторів в умовах дотикового контакту з метою апробації описаного інкрементального підходу. 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 багатокрокового 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 ділянок, періодично з'являючись та зростаючи, не можуть перевищувати розмірів відповідних заданих апіорі стиснутих розрізів. Виділено три фази розвитку процесу проковзування берегів розрізів поздовжнього зсуву.

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 поверхневого натягу як сталей, так і залежних від пружних властивостей матеріалів.

У шостому розділі досліджено вплив на НДС біматеріалу неідеальності будови у вигляді багат шарового тонкого включення. Як окремий випадок досліджено задачу часткового відшарування тонкого ортотропного включення-прошарку у біматеріальній мікроструктурі за умов навантажування силовими чинниками та дислокаціями. Для знаходження невідомих априорі зон проковзування було застосовано інкрементально-ітераційного алгоритм, що дало автору можливість розв'язати низку нетрадиційних задач. Зокрема, визначення «зони безпеки» (області розміщення точок прикладання зосереджених чинників, за яких проковзування не розпочнеться) для забезпечення надійного режиму навантажування структури в умовах експлуатації.

Як інший частковий випадок досліджено поздовжній зсув структури у вигляді однорідного тіла із тонким двошаровим різномодульним включенням. З допомогою СММФС досліджено вплив різномодульності шарів включення, зовнішніх силових чинників за умови ідеального контакту складових структури на знерозмірені параметри НДС на поверхнях включення, виявлено низку механічних ефектів такого впливу.

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

Змістовна частина роботи завершується *висновками*, у яких сформульовано основні результати дисертаційного дослідження.

Мова та стиль дисертації та автореферату свідчать про вміння автора аргументовано викладати свої думки та, у цілому, відповідають вимогам МОН України. Сформульовані у дисертаційній роботі основні положення, висновки та рекомендації викладені у логічній послідовності та доказовій формі, що значно сприяє усвідомленню думок автора. Всі розділи дисертації мають внутрішню єдність і завершеність. Змістове наповнення підрозділів роботи відповідає змісту визначених розділів.

До дисертаційної роботи можна зробити наступні **зауваження**:

1. Ключовим питанням використання тієї чи іншої моделі врахування впливу тонкого включення як структурної неоднорідності на напружено-деформований стан тіла є встановлення критеріїв застосовності вибраної моделі, що накладають певні обмеження на геометричні та фізико-механічні властивості. У частині 2.3 другого розділу це питання обговорюється у процесі побудови узагальненої моделі тонкого включення, однак було б добре уточнити вплив нелінійності поведінки матеріалу на застосовність такої моделі.

2. В роботі відсутні приклади розрахунків для конкретних матеріалів, що значно підвищило б практичну «інженерну» цінність отриманих результатів.
3. Є певні зауваження щодо оформлення тексту дисертації:
 - a. на стор. 103, 108, 137 та ще кількох вжито термін «критичне значення», а на стор. 28, 47, 253 – термін «зона безпеки», які не є усталеними, а тому їх можна розцінити як елемент «наукового сленгу»;
 - b. в тексті роботи іноді трапляються орфографічні та синтаксичні помилки, неузгодженості відмінків слів;

Загальні висновки. Зазначені зауваження не є принциповими, не впливають на високу загальну оцінку дисертаційної роботи та не знижують ступінь обґрунтованості та вірогідності основних її результатів і висновків.

В цілому, дисертаційна робота Піскозуба Й.З. є **завершеним науковим дослідженням**, що з використанням теоретичних побудов та чисельних розрахунків вирішило важливу наукову проблему механіки деформівного твердого тіла, яка полягає у розробленні 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. Отримані підсумкові результати дисертації співпадають із загальною метою і конкретними науковими завданнями, сформульованими у вступі. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертації і дає повне уявлення про отримані результати дослідження та їх наукову новизну та практичну значимість.

За актуальністю теми, обсягом, новизною та якістю наукових досліджень, теоретичним і прикладним значенням одержаних результатів, повнотою її опублікування та якістю апробації дисертаційна робота «Структурно-модульний метод функцій стрибка дослідження деформування біматеріалів з тріщинами і фізично нелінійними тонкими включеннями» відповідає вимогам п.10 і п.13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року, які висуваються до дисертацій, поданих на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук, а її автор, Піскозуб Йосиф Збігневич, заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Завідувач кафедри теоретичної і прикладної механіки
механіко-математичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка МОН України
член-кореспондент НАН України

