

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Шевчука Віктора Анатолійовича** «Математичні моделі та методи термомеханіки тіл з покриттями», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Актуальність теми дисертації. Ефективне використання покриттів широкого спектру призначення, обумовлене з одного боку розвитком матеріалознавства та сучасних технологій обробки поверхні, а з іншого – потребою підвищення ефективності експлуатаційних властивостей елементів конструкцій за зниження їх вартості, ваги, матеріаломісткості і т.д., вимагає вдосконалення існуючих та розробки нових моделей та методів урахування впливу покриттів на параметри теплового та напружено-деформованого стану елементів конструкцій, зокрема, щодо передачі силового та теплового впливу зовнішнього середовища через покриття. Такі моделі та методи повинні враховувати широкий спектр властивостей покриттів (шаруватість, пористість, просторову неоднорідність, анізотропію, контрастність, ступінь адгезії і т.д.) та їх геометричні особливості (тонкість, мікрорельєф і т.д.), що суттєво ускладнює дослідження відповідних задач прикладної термомеханіки. Натомість використання певних модельних спрощень, що не враховують вказані параметри та характеристики, може призвести до неадекватної оцінки термосилового впливу покриття, що ставить під сумнів ефективність спрощених моделей та методів.

У зв'язку з цим окреслюється актуальна наукова проблема, яка полягає у розробленні адекватних математичних моделей та ефективних методів дослідження впливу покриттів на тепловий та напружено-деформований стани елементів конструкцій, на розв'язання якої спрямовано дисертаційну роботу В.А. Шевчука.

Новизна отриманих результатів роботи обумовлена розробленням адекватних математичних моделей термомеханіки для урахування впливу тонких багат шарових та функціонально-градієнтних одношарових покриттів на тепловий та напружений стани пружних тіл з використанням узагальнених граничних умов, отриманих на основі загального просторового формулювання відповідних конституційних рівнянь; на цій основі сформульовано неklasичні крайові задачі теплопровідності і термопружності та розроблено методики їх розв'язування; побудовано аналітичні та аналітично-числові розв'язки низки нових задач теплопровідності та термопружності для тіл з багат шаровими тонкими покриттями за теплового навантаження; розвинуто методику розв'язування задач теорії пружності та термопружності для неоднорідних тіл з анізотропними властивостями з неоднорідними за товщиною покриттями, яку застосовано для дослідження накопичення пошкоджень у керамічних покриттях.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та висновків.

Отримані у роботі результати та висновки є належно обґрунтованими, у достатній мірі опублікованими у вітчизняних та міжнародних фахових журналах та апробованими низкою національних та міжнародних наукових доповідей. Їх достовірність забезпечується коректністю та строгістю постановок задач, використанням відомих та загальноновизнаних положень механіки деформівного твердого тіла та теорії теплопровідності, загальноновживаних та апробованих методів математичної фізики, контрольованою точністю обчислень. Достовірність результатів також

підтверджується фізичною коректністю висновків та їх узгодженням для часткових випадків з результатами, відомими в світовій літературі, які було отримано з використанням інших теоретичних підходів та експериментальних методів. Окремі результати верифіковано на основі розв'язання та аналізу тестових задач.

Повнота висвітлення результатів роботи в опублікованих працях та їх апробація. Усі наведені в роботі основні наукові результати, положення, моделі, висновки та рекомендації отримано автором самостійно, апробовано на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, конгресах і симпозіумах та опубліковано у фахових виданнях. Загалом за темою дисертації опубліковано 57 наукових праць, серед яких автором одноосібно опубліковано 34 праці. Серед публікацій 24 статті у фахових виданнях України і наукових періодичних виданнях інших держав, 31 публікація в матеріалах міжнародних і національних конференцій. У тому числі 15 статей опубліковано у виданнях, віднесених до категорії «А» Переліку наукових видань України, та у міжнародних журналах, проіндексованих у міжнародних наукометричних базах Scopus та WoS. Слід окремо відзначити внесок здобувача у вигляді есе в рамках наймасштабнішого видання у галузі термомеханіки «Encyclopedia of Thermal Stresses» (Springer, 2014). В цілому роботу апробовано на наукових семінарах, зокрема, на профільному науковому семінарі ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України, семінарі кафедри механіки Львівського національного університету імені Івана Франка, науковому семінарі кафедри теоретичної та прикладної механіки Київського національного університету імені Тараса Шевченка, науковому семінарі кафедри математичної фізики Одеського національного університету імені Іллі Мечникова.

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 та виконувалися у рамках низки науково-дослідних тем Інституту впродовж 2002 – 2020 рр. Результати, отримані в дисертаційній роботі, мають вагомe наукове та прикладне значення і можуть використовуватися як у теоретичній сфері при моделюванні та аналізі термопружної поведінки тіл з неоднорідними та багатошаровими покриттями під дією інтенсивних комплексних навантажень, так і для практичних розрахунків та проектування елементів конструкцій із застосуванням функціонально-градієнтних та багатошарових покриттів, прогнозування рівня накопичення пошкоджень у керамічних покриттях, визначення ступеня перенесення термосилового впливу середовища на елементи конструкцій через тонкі багатошарові покриття.

Оцінка основного змісту дисертації. Дисертаційна робота, загальним обсягом у 350 сторінок, складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел. Структурна побудова роботи є логічною, послідовною і добре розкриває зміст викладеного матеріалу.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи, визначено предмет і об'єкт дослідження, розкрито наукову новизну, теоретичне значення та практичну цінність одержаних результатів, зазначено методи дослідження та наведено дані про апробацію результатів, публікації та загальну структуру дисертації.

У *першому розділі*, який можна вважати ключовим розділом роботи, наведено докладний огляд досліджень, які стосуються моделей та методів термомеханіки тіл з покриттями, з якого зокрема логічно окреслюється актуальність та важливість виконаних у роботі досліджень. Розроблено методологію моделювання тонких

покрить з використанням теорії оболонки у такий спосіб, щоб урахувати вплив покриття на тепловий і механічний стан всієї системи тіло – покриття з використанням спеціальних узагальнених граничних умов. У результаті термомеханічний вплив зовнішнього середовища «зноситься» на поверхню поділу тіла з покриттям, що суттєво спрощує процедуру отримання розв'язків відповідних задач теплопровідності та термопружності. Після знаходження теплового напруженого станів тіла з узагальненою граничною умовою розподіл температурного поля у покритті визначається з використанням виведених у роботі формул відновлення.

У *другому розділі* з використанням розробленої у першому розділі математичної моделі з узагальненими граничними умовами отримано аналітичні розв'язки низки задач теплопровідності та термопружності за конвективного теплообміну зі зовнішнім середовищем для півпростору з одностороннім та пластини з двостороннім багат шаровими покриттями. Зокрема детально розглянуто задачу про симетричний нагрів пластини з ідентичними тришаровими покриттями для випадку експоненціального закону зміни температури зовнішнього середовища, на основі якої показано, що розрахунок температурного поля за моделлю із запропонованою узагальненою граничною умовою дозволяє отримати відмінний від рівномірного розподіл температури та напружень за товщиною у шарах покриття, на протиположну моделі, що використовує концепцію «зосередженої ємності». Проаналізовано вплив геометричних, теплофізичних і термомеханічних характеристик покриття та умов теплообміну із зовнішнім середовищем на процес теплопереносу і термопружний стан в системі тіло–багат шарове покриття.

У *третьому розділі* з використанням узагальнених нелінійних граничних умов та методу квазілінеаризації побудовано ітераційну схему розв'язання нелінійної нестационарної крайової задачі теплопровідності для півпростору з багат шаровим покриттям за променево-конвективного теплообміну з довкіллям. Проаналізовано ефективність такого підходу у порівнянні з поширеними методами. Для системи півпростір–двошарове зносостійке покриття досліджено вплив параметрів променево-конвективного теплообміну на нестационарне температурне поле та зумовлений ним термонапружений стан. Виявлено область зміни коефіцієнта теплообміну, в якій променева складова не чинить істотного впливу на термонапружений стан системи.

На основі використання узагальнених граничних умов термомеханічного спряження тіла із середовищем через тонке покриття у *четвертому розділі* розвинуто методику побудови аналітичних розв'язків задачі термопружності для циліндрів з багат шаровими покриттями. Досліджено вплив геометричних і термомеханічних характеристик покриття, умов закріплення торців циліндричної підкладки та умов теплообміну із зовнішнім середовищем на термопружний стан системи тіло–багат шарове покриття за конвективного нагрівання. Для випадку покриття малої жорсткості отримано прості наближені формули для якісної оцінки усталених напружень у системі.

У *п'ятому розділі* розроблено методику розв'язування одновимірних задач теорії пружності та термопружності для циліндричних тіл з неоднорідними трансверсально ізотропними покриттями довільної товщини. Ця методика ґрунтується на зведенні вихідних диференціальних рівнянь задач до інтегральних рівнянь другого роду, які розв'язано методом простих ітерацій.

Шостий розділ присвячено використанню моделей та методів, розвинутих у попередніх розділах, для дослідження процесу накопичення пошкоджень у елементах конструкцій з керамічними тонкими шаруватими і товстими неоднорідними покриттями за теплового навантаження. Зокрема для неоднорідних тонких

багатошарових керамічних покриттів суттєвого спрощення досягнуто із застосуванням математичної моделі з узагальненими граничними умовами для термомеханічного спряження підкладки із середовищем через покриття. Ці умови для керамічних покриттів враховують їх анізотропію, просторову неоднорідність, початкову пористість, термочутливість, та залежність пружних модулів покриття від ступеня пошкодженості. Для покриттів довільної товщини було узагальнено аналітичний підхід, який базується на зведенні вихідної задачі термопружності до системи інтегральних рівнянь. Вивчено особливості процесів накопичення пошкоджень при рівномірному нагріві конструкцій з тонкими багатошаровими і товстими покриттями.

В останньому *сьомому розділі* розглянуто нестационарну задачу термопружності для системи півпростір – багатошарове покриття з тріщиною під покриттям, перпендикулярною поверхні поділу, за теплового навантаження поверхні покриття. З використанням принципу суперпозиції задачу з тріщиною зведено до чисельного розв'язування сингулярного інтегрального рівняння, а процедуру розв'язування задачі без тріщини спрощено з використанням математичної моделі з узагальненими граничними умовами теплообміну підкладки з середовищем через багатошарове покриття. Це дало можливість отримати замкнутий аналітичний розв'язок відповідної задачі термопружності для багатошарової системи, що є зручним для аналізу розв'язку задачі для середовища без тріщини, і для подальшого використання для задачі з тріщиною. Виконані числові розрахунки дозволили оцінити вплив різних геометричних і термомеханічних параметрів системи тіло-покриття на термічні напруження та коефіцієнти інтенсивності термічних напружень.

Змістовна частина роботи завершується загальними висновками, що відображають основні результати роботи.

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

1. Ключовим питанням використання тієї чи іншої моделі врахування впливу покриття на тепловий та напружений стани тіла з використанням узагальнених граничних умов є встановлення критеріїв застосовності вибраної моделі, що накладають певні обмеження на геометричні та термомеханічні властивості покриття. У частині 1.1.7 першого розділу роботи здійснено дослідження застосовності певних варіантів узагальнених граничних умов, отриманих із загального випадку, наприклад, утримання лінійних чи квадратичних членів відносно товщини покриття, для певного механізму взаємодії тіла із середовищем через покриття. Втім було б добре узагальнити зроблені висновки про застосовність розглянутих варіантів узагальнених граничних умов для інших типів теплової взаємодії та товщин покриттів.
2. Важливою функцією зміцнюючих покриттів є «заліковування» пошкоджень поверхні у вигляді тріщин. У розділі 7 роботи розглянуто задачу про вплив тріщини на термонапружений стан півпростору з покриттям. При цьому досліджено лише випадок перпендикулярної до поверхні тріщини, яка не виходить на межу поділу тіла з покриттям. Втім, саме випадок виходу тріщини на поверхню тіла було б цікаво дослідити з використанням розробленого автором апарату узагальнених граничних умов зокрема щодо виявлення зміцнювального впливу покриття.
3. Є певні зауваження щодо оформлення тексту дисертації:

- 3.1) у першому реченні підрозділу 1.1.1 (ст. 42) слід вказати, що δ_i – це товщини шарів багат шарового покриття;
- 3.2) на ст. 52 сказано «Цікавим частковим випадком УГУ (1.37) є ситуація при $\mu \rightarrow \infty$ », а нижче наведено отриманий у цьому випадку варіант граничної умови. Втім ніяк не роз'яснено, чим саме є «цікавий» цей частковий випадок;
- 3.3) на ст. 64, 73 вжито термін «механічні змінні тіла», який не є загально вживаним, а тому його можна розцінити як елемент «наукового сленгу».

Загальні висновки. Зроблені зауваження не впливають на високу загальну оцінку дисертаційної роботи і не зменшують ступеня обґрунтованості та вірогідності основних її результатів та висновків.

В цілому дисертаційна робота Шевчука В.А. є **завершеним науковим дослідженням**, що з використанням теоретичних побудов та чисельних розрахунків вирішила важливу наукову проблему механіки твердого деформівного тіла, що полягає у розробці ефективних моделей та методів термомеханіки тіл з багат шаровими та неоднорідними покриттями. Зміст автореферату повністю відповідає змісту роботи і є ідентичним її основним положенням. Тексти дисертаційної роботи та автореферату викладено на належному науковому та літературному рівні та оформлено згідно з відповідними вимогами. Загальні висновки роботи повністю відповідають її меті.

За актуальністю теми, обсягом, новизною та якістю наукових досліджень, теоретичним і прикладним значенням одержаних результатів, повнотою її опублікування та якістю апробації, дисертаційна робота «Математичні моделі та методи термомеханіки тіл з покриттями» повністю 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, Шевчук Віктор Анатолійович, 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
доктор фіз.-мат. наук, професор

Я.О. Жук

