

**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.**

З метою змінення конструкційних елементів та захисту від агресивного впливу середовища на їхню поверхню наносять спеціальні покриття з відмінними від основного матеріалу фізико-механічними характеристиками. При експлуатації у таких елементах виникає нерівномірний розподіл температури і з'являються напруження та деформації, які можуть спричинити відшарування покриття та руйнування елементів конструкцій. Дослідження впливу покрить на теплові процеси і напружений стан в системі тіло-покриття з врахуванням умов спряження та взаємодії із зовнішнім середовищем, технологічно наведеної неоднорідності, термомеханічної анізотропії, залежності властивостей покриття та підкладки від температури викликає суттєві математичні та обчислювальні труднощі. Тому є важливим розроблення методології (математичних моделей та методів розв'язування задач термомеханіки), яка дозволяє відносно просто, але при тому достатньо точно розраховувати термонапруженій стан системи. З огляду на це, актуальність дисертаційного дослідження В. А. Шевчука, метою якого є побудова математичних моделей і розробка ефективних методів розрахунку термонапруженого стану тіл з багатошаровими тонкими та одношаровими неоднорідними ізотропними та анізотропними покриттями за силового та теплового навантаження, не викликає жодного сумніву.

Дисертаційне дослідження проведено згідно з науковою держбюджетною тематикою Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН.

## **Наукова новизна дисертаційної роботи.**

Найважливіші результати дисертаційного дослідження, що визначають наукову новизну роботи, такі:

- 1) побудовано нові математичні моделі для визначення температурного поля та теплових напружень в тілах з шаруватими покриттями, які ґрунтуються на застосуванні узагальнених граничних умов (УГУ);
- 2) сформульовано нові некласичні краєві задачі тепlopровідності та термопружності для тіл плоскої і циліндричної геометрії з тонкими багатошаровими покриттями, розроблено та реалізовано методи їх розв'язування;
- 3) запропоновано аналітично-числовий метод розв'язування із використанням квазілінеаризації та інтегрального перетворення Лапласа нестационарної задачі термопружності для тіл з покриттями з нелінійною УГУ при конвективно-променевому теплообміні;
- 4) розвинено підхід до розв'язування задач теорії пружності та термопружності для випадку циліндрів з трансверсально ізотропними покриттями зведенням до інтегральних рівнянь;
- 5) створені методики визначення термонапруженого стану покрить застосовано до аналізу процесу накопичення пошкоджень у керамічних покриттях циліндричних елементів конструкцій.

## **Достовірність та обґрунтованість наукових положень та висновків.**

Вірогідність отриманих у роботі результатів та основних наукових положень ґрунтується на використанні відомих визначальних положень механіки деформівного твердого тіла, математичної коректності формулювань задач та їх розв'язанням за допомогою апробованих аналітичних і числових методів, аналізом збіжності побудованих ітераційних алгоритмів та співставленням і узгодженням деяких часткових результатів із результатами, отриманими іншими авторами.

**Теоретичне значення і практична цінність.** Теоретичне значення дисертації полягає у її вагомому внеску до галузі механіки неоднорідних тіл. У роботі запропоновано методологію розв'язування задач термомеханіки тіл

з тонкими покриттями, в основі якої моделювання впливу таких покрить за допомогою УГУ, а також розвинуту методику розв'язування одновимірних задач теорії термопружності для циліндричних тіл з трансверсально ізотропними неоднорідними покриттями довільної товщини та запропоновано підхід до вирішення задачі теплопровідності з нелінійною УГУ на основі удосконаленого ітераційного методу.

Практична цінність результатів роботи полягає у можливості безпосереднього використання отриманих результатів, розроблених методик та розв'язків задач при проведенні інженерних розрахунків у практиці проектування реальних конструкцій.

**Повнота викладу основних положень дисертації в публікаціях і авторефераті та їх апробація.** Автор має значний список наукових публікацій, що відповідає всім вимогам до висвітлення результатів наукових досліджень у дисертації на здобуття вченого ступеня доктора наук. За результатами дослідження опубліковані 57 праць (34 самостійних), з яких 24 статті – у фахових виданнях у галузі фізико-математичних наук із Переліку ДАК МОН України та інших держав, 2 – у інших виданнях, а 15 статей (10 самостійних) проіндексовано у міжнародній наукометричній базі Scopus. У роботі чітко визначено участь автора у колективних публікаціях.

Рецензована праця має достатню апробацію на 3 українських і 24 міжнародних наукових конференціях, проведених у таких країнах, як Австрія, Білорусь, Велика Британія, Китай, Німеччина, Польща, США, Тайвань та Угорщина.

Автореферат повністю висвітлює зміст, основні ідеї, положення та результати дисертаційної роботи.

**Аналіз змісту дисертаційної роботи та її результатів.** Дисертація В. А. Шевчука є завершеною науковою працею, оформленою згідно з вимогами ДАК МОН України, яка складається зі вступу, семи розділів, кожний з яких завершується висновками, загальних висновків, списку використаних джерел та двох додатків.

У *вступі* обґрунтовується актуальність теми, формулюються мета і завдання дисертаційної роботи, показується зв'язок із науковими програмами, планами, темами, визначаються предмет і об'єкт дослідження, формулюється наукова новизна. Розглядаються теоретичне значення та практична цінність одержаних результатів, наводяться відомості про особистий внесок дисертанта, аprobaciю роботи, публікації та загальну структуру дисертації.

*Перший розділ* присвячено розробленню методології розв'язування задач термомеханіки тіл з тонкими покриттями, яка ґрунтуються на моделюванні покрить оболонками з відповідними термомеханічними властивостями покриття. Вплив покрить на тепловий і механічний стани всієї системи тіло-покрите описується спеціальними УГУ, а саме визначення теплового поля і відповідних термонапружень у тілі зводиться до розв'язування некласичних краївих задач математичної фізики, а в покритті – до застосування формул відтворення через вже знайдені граничні значення термомеханічних змінних у тілі.

У *другому розділі* досліджено вплив тонких покрить на термонапружений стан тіл з плоскими границями, сформульовано нестационарні задачі тепlopровідності і відповідні задачі термопружності для півпростору з одностороннім та пластини з двостороннім багатошаровим покриттям. Отримано аналітичні розв'язки задач тепlopровідності та термопружності за конвективного теплообміну з зовнішнім середовищем на основі запропонованої у першому розділі математичної моделі з використанням УГУ.

У *третьому розділі* сформульовано, на основі математичної моделі теплових процесів у тілах з тонкими шаруватими покриттями, нелінійну нестационарну задачу тепlopровідності та відповідну задачу термопружності для півпростору з багатошаровим покриттям за променево-конвективного теплообміну з зовнішнім середовищем. Із застосуванням методу квазілінеаризації та інтегрального перетворення Лапласа побудовано ітераційну схему розв'язання цієї нелінійної краївої задачі тепlopровідності, проведено аналіз впливу геометричних і теплофізичних характеристик покриття та параметрів променево-конвективного теплообміну з довкіллям на теплові процеси та напружений стан в досліджуваній системі.

У четвертому розділі здійснено постановки статичної задачі пружності і нестационарних задач тепlopровідності та термопружності для циліндра з багатошаровим покриттям. Отримано їх аналітичні розв'язки на основі використання УГУ.

Досліджено вплив фізико-механічних характеристик системи тіло-багатошарове покриття, параметрів теплообміну із зовнішнім середовищем та умов закріплення торців циліндра на розподіли температури і напружень.

У п'ятому розділі розвинуто метод безпосереднього інтегрування диференціальних рівнянь рівноваги й сумісності в напруженнях одновимірних задач пружності та термопружності для циліндричних тіл з неоднорідними трансверсально ізотропними покриттями.

У шостому розділі розроблені підходи до визначення напруженодеформованого стану покрить застосовано для дослідження процесу накопичення пошкоджень у керамічних тонких багатошарових і товстих одношарових покриттях під впливом теплових навантажень.

Сьомий розділ присвячений розв'язуванню нестационарної задачі термопружності за конвективного теплообміну з довкіллям півпростору з багатошаровим покриттям за наявності тріщини під покриттям, перпендикулярної до поверхні поділу.

У висновках до дисертації узагальнено отримані наукові та практичні результати, сформульовано висновки, одержані на основі проведених числових досліджень, та окреслено можливості прикладного застосування результатів.

Список літератури, що нараховує 586 найменувань, повною мірою представляє сучасний науковий стан проблематики дослідження.

Однак до рецензованої дисертаційної роботи можна зробити деякі зауваження та побажання, зокрема:

1. У дисертації УГУ теплообміну виведені для кусково-однорідних багатошарових покрить, в той час як відповідні УГУ механічного спряження розширені й для випадку неперервної неоднорідності у межах окремих шарів. Було б бажано розвинути і теплові УГУ для такого випадку, оскільки функціонально-градієнтні покриття відіграють надзвичайно важливу роль у сучасній техніці.

2. В обґрунтуванні актуальності дисертації зазначається важливість врахування температурної залежності параметрів системи «тіло-покриття» при побудові математичних моделей для опису термомеханічної поведінки такої системи. Однак в роботі таку залежність фактично враховано лише для коефіцієнтів лінійного температурного розширення матеріалів підкладки та покриття в УГУ механічного спряження. Варто було б її врахувати також і для теплофізичних параметрів при моделюванні та дослідженні процесу тепlopровідності в тілах з покриттями.
3. У другому і четвертому розділах при числовому дослідженні розв'язків задач тепlopровідності та термопружності для півпростору, пластини і циліндра був проведений параметричний аналіз впливу властивостей покриття та умов теплообміну з середовищем на розподіл температури і напружень в безрозмірному вигляді. Однак доречно було б провести розрахунки і для конкретних задач стосовно реальних систем підкладка–покриття.
4. У шостому розділі досліджено еволюцію пошкоджень у керамічних покриттях за рівномірного нагрівання з використанням УГУ термомеханічного спряження тіла з середовищем через трансверсально ізотропне покриття. Окрім цього, доцільно було б проаналізувати і закономірності самого напруженодеформованого стану циліндричних тіл з багатошаровими трансверсально ізотропними покриттями, що становить самостійний науковий інтерес.
5. У сьомому розділі розв'язано та досліджено задачу термопружності для півпростору з внутрішньою тріщиною, яка розташована у підкладці–півпросторі перпендикулярно до поверхні поділу з покриттям. Було б доцільно проаналізувати теоретично та практично важливі приклади іншого розташування тріщини, зокрема, коли вона паралельна поверхні поділу, міститься частково чи повністю у самому покритті, або навіть виходить на поверхню покриття.

Однак, зазначені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи.

**Висновок.** Дисертація В. А. Шевчука є актуальним, значним за охопленням і розробленням проблематики дослідженням, спрямованим на розв'язання нагальної науково-технічної проблеми, яка полягає у необхідності побудови моделей та ефективних методів розрахунку термонапруженого стану тіл з багатошаровими тонкими та одношаровими неоднорідними ізотропними та анізотропними покриттями. Дисертаційне дослідження здійснено на високому рівні у відповідності з поставленою метою та завданнями. Одержані наукові та практичні результати належно представлені в публікаціях, обґрунтовані та обговорені.

Мова і стиль дисертації та технічне оформлення тексту також виконані на належному рівні.

Тема і зміст дисертаційної праці відповідають паспорту спеціальності 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

За актуальністю, науковою новизною, обсягом, теоретичним значенням та прикладною цінністю результатів, повнотою їх опублікування, дисертаційна робота **“Математичні моделі та методи термомеханіки тіл з покриттями”**, цілком відповідає вимогам пп. 10, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р., № 567 (зі змінами і доповненнями) до докторських дисертацій, а її автор – **Шевчук Віктор Анатолійович** – заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

### Офіційний опонент

професор кафедри вищої математики

Національного університету «Львівська політехніка»

доктор фізико-математичних наук професор



Р.С. Мусій

Відповідь

Від *Р. Брюссельська*