

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Гембари Наталії Олександрівни

**«Математичне моделювання теплопровідності  
пластин і оболонок з багатошаровими покриттями»**,  
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання  
та обчислювальні методи

### **Актуальність теми дисертації.**

Оболонкові конструкції із нанесеними на них захисними покриттями широко використовуються в сучасній інженерній практиці. Зазвичай вони працюють у середовищах з високими чи низькими температурами та великими їх перепадами, тому визначення температурного поля таких конструкцій є важливим для забезпечення їх надійного функціонування. Актуальність дисертаційної роботи зумовлена необхідністю адекватного математичного опису процесів теплопереносу в тілах з покриттями для набуття кращих технологічних властивостей несучих конструкцій з покриттями з подальшим врахуванням їх фізико-механічних властивостей для оцінки міцності конструкції. Об'єкти, які розглядаються в дисертаційній роботі, мають складну багатошарову структуру. Розв'язування задачі теплопровідності оболонки суттєво ускладнюється за наявності тонких шарів покриття з різними теплофізичними характеристиками. Труднощі математичного моделювання пов'язані, перш за все, з урахуванням геометричних та теплофізичних властивостей кожного шару покриття. Огляд та аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури засвідчує, що для знаходження розв'язків таких задач переважно використовують числові методи, теоретичних досліджень теплопровідності в оболонках з тонкими багатошаровими покриттями проведено недостатньо. Тема роботи є розвитком підходів і методів, які розроблялись в термодинаміці суцільного середовища. Тому дисертаційна робота Гембари Н.О., яка присвячена

математичному моделюванню теплопровідності оболонок та пластин з багатошаровими покриттями, є актуальною.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи, її завершеність.**

Розглянута дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та трьох додатків.

Повний обсяг дисертації становить 128 сторінок, основний текст роботи викладено на 109 сторінках. Дисертація містить 25 рисунків та 2 таблиці. Список літератури із 138 найменувань викладено на 15 сторінках.

У вступі висвітлена актуальність теми та наукової проблематики дисертації, сформульовані мета і завдання досліджень, визначена наукова новизна і практична цінність результатів, отриманих в роботі, показано зв'язок задач з науковими програмами, планами, темами.

В першому розділі висвітлено сучасний стан математичного моделювання процесів теплопровідності в елементах конструкцій з покриттями, здійснено огляд праць за темою дисертації, а саме методи розв'язування нестационарних рівнянь теплопровідності в оболонках та пластинах, які є найбільш поширеними корпусними елементами у ракетній та авіаційній техніці, судно та автомобілебудуванні, хімічному машинобудуванні тощо. Проаналізовано дослідження із статичної та динамічної термopружності та методи розв'язування відповідних диференціальних рівнянь для кусково-однорідних термочутливих тіл з тонкими покриттями та включеннями. На цій основі сформульовано постановку, обґрунтування задач дослідження нестационарних процесів теплопровідності та намічено напрямки для їх вирішення.

В другому розділі розроблені математичні моделі процесу теплопровідності в оболонках і пластинах з односторонніми та двосторонніми багатошаровими покриттями, за умов конвективного теплообміну на поверхнях.

Задачу розв'язано операторним методом. Кожний шар покриття розглядався як тонка оболонка з відповідними теплофізичними

характеристиками. На контактних поверхнях оболонки і шару виконуються умови ідеального теплового контакту. На поверхнях контакту оболонки з зовнішнім середовищем відбувається теплообмін за законом Ньютона. Задаються умови на торцевих поверхнях та початкова умова. На основі узагальнення задачі теплопровідності оболонки з одношаровим та двошаровим покриттям, отримано умову теплообміну оболонки через одностороннє багат шарове покриття, в яку входять узагальнені коефіцієнти теплопровідності оболонки і тепловіддачі з її поверхні, що виражені через теплофізичні характеристики шарів покриття. Введено інтегральні характеристики температури, через які виражається напружено-деформований стан оболонки. Таким чином трьохмірна нестационарна задача зведена до інтегрування системи двох рівнянь в частинних похідних по двох координатах і часу на серединній поверхні оболонки. Температура в будь-якій точці виражається через інтегральні характеристики температури оболонки. Для отримання диференціальних рівнянь для цих характеристик використовуються узагальнені граничні умови теплообміну, отримані в дисертаційній роботі. Побудовано також рівняння теплопровідності оболонок і пластин з двостороннім багат шаровим покриттям з різними товщинами і різними теплофізичними властивостями.

В третьому розділі на основі розробленого підходу розв'язано низку температурних задач для круглих пластин та циліндричних оболонок з покриттями. Зокрема визначено стаціонарне температурне поле в круглій пластині сталої товщини з центральним вирізом та двостороннім багат шаровим покриттям. Рівняння теплопровідності зводяться до системи модифікованих рівнянь Бесселя та відповідних граничних умов на внутрішньому та зовнішньому контурах диска відносно інтегральних характеристик температури. Побудовано розв'язок такої крайової задачі. Визначено стаціонарне та нестационарне температурне поле в круглій суцільній пластині постійної товщини з двостороннім багат шаровим покриттям. Для розв'язання рівняння теплопровідності, що описує

нестационарне поле, використано інтегральне перетворення Лапласа. З використанням теореми розкладу отримано вираз для температури пластини.

Визначено нестационарне температурне поле в нескінченній циліндричній оболонці з однаковим двостороннім багат шаровим покриттям з нульовою початковою температурою, яка ззовні і зсередини нагрівається шляхом конвективного теплообміну з середовищем. Розв'язок рівняння теплопровідності отримано з використанням перетворення Фур'є. Розглянуто задачу про нестационарне температурне поле у півобмеженій циліндричній оболонці з одностороннім багат шаровим покриттям. Для розв'язання задачі застосовано інтегральне перетворення Лапласа. Також методом інтегрального перетворення Лапласа та використанням теореми розкладу знайдено розв'язок задачі про температурне поле в циліндричній оболонці з двостороннім багат шаровим покриттям скінченних розмірів.

Таким чином, з використанням методу розділення змінних та інтегрального перетворення Лапласа одержано аналітичні розв'язки модельних задач стаціонарного та нестационарного процесів теплопровідності для пластин та циліндричних оболонок з односторонніми та двосторонніми покриттями.

В четвертому розділі проведено апробацію отриманих в третьому розділі розв'язків задач теплопровідності для круглої пластини з двосторонніми тонкими покриттями та циліндричної оболонки з односторонніми багат шаровими покриттями з різними теплофізичними властивостями. Апробація отриманих результатів з експериментальними та числовими даними показала, що максимальне значення похибки експериментального, числового та модельного розподілу температури відповідних елементів не перевищує 3-5%. Це обґрунтовує можливість використання для інженерної практики отриманих в роботі результатів. Також у розділі проаналізовано вплив двошарового покриття на термопружний стан суцільного диска газової турбіни та циліндричного корпусу автоклава.

У додатках подано довідки про використання результатів дисетаційного дослідження.

Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи та основні поставлені завдання для її досягнення.

### **Відповідність автореферату змісту дисертації.**

Викладені в авторефераті актуальність теми, мета і завдання дослідження, наукова новизна отриманих результатів та їхнє практичне значення, особистий внесок дисертанта, короткий зміст розділів повністю відповідають змісту дисертації. Автореферат оформлений згідно з вимогами МОН України.

### **Повнота викладу в опублікованих працях:**

результати роботи достатньо повно опубліковані (дев'ятнадцять наукових публікацій, з них одинадцять у фахових виданнях).

### **Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджена:**

- коректним застосуванням математичного апарату як для побудови математичних моделей кількісного опису теплопровідності в оболонках з покриттями так і для розв'язання конкретних задач;
- використанням відомих моделей та підходів теорії теплопровідності оболонок при побудові математичних моделей для оболонок та пластин з покриттями;
- використанням методу інтегрального перетворення Лапласа за часом та методу Фур'є за координатою для розв'язання диференціальних рівнянь в частинних похідних 2 - го порядку;
- узгодженням отриманих автором розв'язків з відомими в літературі результатами, знайденими в часткових випадках та отриманими за допомогою чисельних і експериментальних методів;
- апробаціями на наукових семінарах та конференціях, у тому числі міжнародних.

**Наукова новизна результатів роботи полягає у наступному:**

- розвинуто теорію теплопровідності оболонок та пластин з урахуванням багатошарових покриттів;
- побудовані нові математичні моделі теплопровідності для оболонок з багатошаровими покриттями, які враховують теплофізичні характеристики усіх шарів покриття;
- на основі математичних моделей сформульовано та розв'язано стаціонарні та нестаціонарні крайові задачі теплопровідності круглих пластин та циліндричних оболонок з багатошаровими покриттями, поверхні яких контактують із середовищами різних температур.

#### **Важливість для науки одержаних автором дисертації результатів.**

Результати, отримані в дисертаційному дослідженні, є внеском у розвиток кількісної теорії теплопровідності тонких оболонок з урахуванням багатошарових покриттів. Побудовані нові математичні моделі дозволяють розширити клас розв'язуваних задач теплопровідності пластин та оболонок з захисними багатошаровими покриттями.

#### **Практична цінність результатів.**

Отримані замкнені аналітичні розв'язки є відносно простими і зручними для практичного використання та враховують перепад температури за товщиною покриття, що є суттєвим для подальшого розрахунку термопружного стану в тонкостінних елементах конструкцій з багатошаровими покриттями.

Побудовані математичні моделі, методика дослідження, обчислювальні алгоритми дозволяють їх безпосереднє застосування при розв'язуванні практичних задач, які описуються рівняннями теплопровідності в оболонках та пластинах з тонкими покриттями.

Результати роботи було використано при розробці «Рекомендацій із вимірювання характеристик напружено-деформованого стану елементів мостів при змінних температурах», які виконані Філією Державного дорожнього інституту ім. М.П.Шульгіна «Львівського регіонального науково-технічного центру», при дослідженнях водневої стійкості корпусів

реакторів гідрокрекінгу нафти, виконаних «Дослідним заводом «Промкотлосервіс», а також стали основою науково-практичного видання «Рекомендації із визначення температури в оболонках та пластинах з багат шаровими покриттями» Й.Й. Лучка та Н.О. Гембари.

Науковими розробками Н.О. Гембари укомплектовані навчальні дисципліни Української академії друкарства: «Обладнання для виготовлення упаковок» та «Нові технології в пакувальному виробництві».

#### **За змістом роботи зроблено такі зауваження:**

1. У другому розділі дисертації, формулюючи узагальнені крайові умови, доцільно було б докладніше описати та проаналізувати, як саме на них впливають характеристики покриття: теплофізичні властивості, товщина, почерговість нанесення.
2. В третьому розділі доцільно було б розглянути зв'язану задачу теплопровідності пластини і циліндричної оболонки з багат шаровим покриттям ( корпус та дно).
3. В роботі та авторефераті трапляються орфографічні помилки при відмінюванні іменників (сторінка 19 – безліч розв'язок, стор. 24 – належать А.Д.Коваленко, Ю.М. Коляно, неправильно вказані прізвища – Підстрігачу), пропущені букви та розділові знаки в словах (стор.31,32).

Необхідно зазначити, що зроблені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи і не зменшують ступеня обґрунтованості та достовірності основних результатів і висновків.

#### **Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України.**

За актуальністю теми, новизною, науковою і практичною цінністю результатів дисертаційна робота Гембари Н.О. “Математичне моделювання теплопровідності пластин і оболонок з багат шаровими покриттями” відповідає діючим вимогам МОН України і паспорту спеціальності «Математичне моделювання та обчислювальні методи» (технічні науки), а саме напряму «Розроблення або розвиток теорії математичного моделювання

реальних явищ, об'єктів, систем чи процесів як сукупності формалізованих дій (операцій) для складання ефективних математичних описів досліджуваних об'єктів» Зокрема, отримання нових математичних моделей процесів теплопровідності оболонок з багатошаровими покриттями.

Оформлення дисертації відповідає вимогам, які ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Результати досліджень у повній мірі відображено у фахових наукових виданнях. Робота пройшла достатню апробацію. Дисертаційна робота акуратно оформлена, текст викладено ясно і послідовно.

Дисертаційна робота „Математичне моделювання теплопровідності пластин і оболонок з багатошаровими покриттями” є завершеною науковою працею, у якій вирішуються важливі як в науковому, так і в практичному відношеннях задачі, за новизною отриманих результатів та ступенем їх обґрунтованості відповідає вимогам п. 13,14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор Гембара Наталія Олександрівна заслуговує присвоєння їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

провідний науковий співробітник

відділу неklasичних задач механіки і тепломасопереносу

Центру математичного моделювання

ІППММ ім. Я.С.Підстригача НАН України

докт.техн.наук, старш. наук. співробітник

Б.І. Гайвась

Підпис Гайвась Б.І. засвідчую