

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Калиняка Богдана Миколайовича** «Аналітичне визначення термосилових навантажень, які забезпечують цільові термонапружені стани у неоднорідних тілах», подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Актуальність теми дисертації. Ефективне використання композитів, зокрема, функціонально-градієнтних матеріалів, обумовлене з одного боку потребою підвищення ефективності експлуатаційних властивостей елементів конструкцій в умовах перепаду температур, а з іншого – розвитком матеріалознавства та сучасних технологій проектування і виготовлення композиційних матеріалів. Однак відомо, що напружений стан, зумовлений внутрішніми та зовнішніми факторами навантажень (тепловими, силовими та ін.), активізує деструктивну зміну характеристик матеріалу елементів конструкцій. Адекватний аналіз такого деструктивного впливу вимагає адаптації існуючих та розроблення нових моделей та методів визначення термонапруженого стану неоднорідних тіл, маючи на меті, зокрема, забезпечення цільових розподілів напружень та напрацювання способів їх забезпечення. Задачі такого класу здебільшого мають характер обернених, а відтак є достатньо складними для розв'язання як з використанням аналітичних, так і числових методів.

У зв'язку з цим окреслюється актуальна наукова проблема, яка полягає у побудові адекватних математичних моделей термопружності щодо встановлення фізично обґрунтованих способів теплового навантаження і критеріїв вибору пружних та теплофізичних характеристик матеріалів для забезпечення температурних полів, які з урахуванням відповідних умов силового навантаження чи закріплення спричиняють бажаний розподіл термонапружень у неоднорідних елементах конструкцій, зокрема їх відсутність. На розв'язання цієї проблеми спрямовано дослідження дисертаційної роботи Б.М. Калиняка.

Новизна отриманих результатів роботи обумовлена розробленням математичної моделі теорії термопружності з використанням підходу безпосереднього інтегрування для встановлення умов забезпечення заданого розподілу термонапружень, зокрема, їх відсутності, у неоднорідних тілах з урахуванням залежності характеристик матеріалів від однієї та двох координат. Сформульовано класи обернених задач про визначення температурних полів, які спричиняють заданий розподіл компоненти тензора напружень. Отримано точні аналітичні вирази для температурних полів, які спричиняють заданий розподіл компонент тензора напружень через фізико-механічні характеристики матеріалу та проаналізовано можливість їх забезпечення умовами нагрівання та підбором характеристик двокомпонентних функціонально-градієнтних матеріалів в межах моделі простої суміші.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та висновків. Отримані у роботі результати та висновки є у достатній мірі опублікованими в

вітчизняних фахових та міжнародних журналах, включених у міжнародну науково-метричну базу SCOPUS та апробованими на міжнародних конференціях. Їх достовірність забезпечується коректністю та строгістю постановок задач, використанням відомих положень механіки деформівного твердого тіла та теорії теплопровідності, апробованих методів математичної фізики, контрольованою точністю обчислень. Побудовані аналітичні розв'язки задовольняють використані нелінійні диференціальні рівняння і умови на межах. Числові експерименти підтверджують можливість застосування отриманих результатів для реальних матеріалів, що є додатковим критерієм обґрунтованості основних положень і висновків.

Повнота висвітлення результатів роботи в опублікованих працях та їх апробація. Усі наведені в роботі наукові результати, положення, моделі, висновки та рекомендації отримано автором самостійно, апробовано на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, конгресах і симпозиумах та опубліковано у фахових виданнях. Загалом за темою дисертації опубліковано 55 наукових праць, в тому числі 25 статей у журналах і збірниках, які відповідають вимогам ДАК України до фахових видань. Десять статей прореферовані у міжнародних наукометричних базах SCOPUS і Web of Science. Самостійно опубліковано 11 статей і 14 тез. Здобувач також є співавтором статті в рамках наймасштабнішого видання у галузі термомеханіки «Encyclopedia of Thermal Stresses» (Springer, 2014). У повному обсязі робота доповідалася на семінарах відділу механіки деформівного твердого тіла, об'єднаному семінарі відділів механіки деформівного твердого тіла та термомеханіки, кваліфікаційному семінарі Інституту прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача Національної академії наук України, спільному засіданні комісії механіки і матеріалознавства Наукового товариства імені Шевченка, наукових семінарах кафедри механіки Львівського національного університету імені Івана Франка, кафедри теоретичної і прикладної механіки Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кафедри методів математичної фізики Одеського національного університету імені І.І. Мечникова, кафедри теоретичної і комп'ютерної механіки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Практичне значення отриманих результатів та можливість їх використання. Дослідження за темою дисертації виконано здобувачем у рамках науково-дослідних тем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України впродовж 2004 – 2023 рр. Результати, отримані в дисертаційній роботі, мають вагомe наукове та прикладне значення. Їх можна використовувати для проектування неоднорідних матеріалів елементів конструкції простої форми, які будуть використовувати в умовах перепаду температур, перевірки ефективності числових методів оптимізації властивостей функціонально-градієнтних матеріалів, оцінки умов нагрівання та усереднених характеристик матеріалів які спричиняють заданий розподіл напружень в елементах конструкцій.

Оцінка основного змісту дисертації. Дисертаційна робота, обсягом у 345 сторінок, складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку використаних джерел, двох додатків. Структура 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* «Розвиток моделей та методів визначення термонапруженого стану неоднорідних тіл» наведено огляд літературних джерел, який є підставою для вибору тематики досліджень. Він стосується аналізу досліджень щодо розвитку математичних моделей термонапруженого стану тіл з урахуванням взаємодії полів різної фізичної природи, визначення напружено-деформованого стану неоднорідних та функціонально-градієнтних тіл різної форми, розроблення моделей визначення властивостей композитних матеріалів за характеристиками їх складових з урахуванням особливостей мікроструктури, дослідження обернених задач механіки деформівного твердого тіла, їх класифікації та методів розв'язування, зокрема, стосовно неоднорідних тіл.

У *другому розділі* «Ключові рівняння для визначення температурних полів, які спричиняють цільові розподіли напружень у неоднорідних тілах» подано теоретичні основи роботи. За основу взято диференціальні рівняння теорії пружності у напруженнях у тензорному формулюванні в ортогональних криволінійних системах координат з фізико-механічними характеристиками матеріалу, температурним полем та компонентами тензора напружень, залежними від однієї просторової координати. Відповідні задачі теорії термопружності зведено до інтегральних рівнянь Вольтерри з інтегральними умовами або Фредгольма другого роду. Ці рівняння є зручними у використанні для розв'язання прямих та обернених задач теорії пружності у випадку довільної залежності характеристики матеріалів від координат. Сформульовано обернені задачі визначення умов відсутності термонапружень або формування їх заданого розподілу у тілах, які зазнають температурного впливу, якщо характеристики матеріалів залежать від однієї або двох координат. Забезпечення таких напружених станів здійснюють за рахунок спеціально підібраних температурних полів при заданому розподілі теплофізичних характеристик неоднорідного матеріалу або формування відповідних профілів неоднорідності матеріалу при заданих термосилових навантаженнях.

У *третьому розділі* «Визначення умов нагрівання неоднорідних тіл, що забезпечують відсутність термонапружень» використано отримані у другому розділі інтегральні рівняння Фредгольма для визначення температурних полів, які не викликають теплових напружень у неоднорідних тілах (шар, порожнисті циліндр, куля). Показано, що таке поле можна створити, якщо узгодити умови теплообміну на межах тіла, а відношення температур поверхонь не повинно перевищувати відношення коефіцієнтів лінійного теплового розширення

функціонально-градієнтного матеріалу на поверхнях. Відповідне температурне поле в тілі з функціонально-градієнтного матеріалу на відміну від температурного поля у тілі зі сталими характеристиками можна створити з допомогою об'ємних теплових джерел. Можливість практичної реалізації таких полів при обмеженнях на значення характеристик матеріалів та густини потужності теплових джерел досліджено за допомогою числових експериментів.

У *четвертому розділі* під назвою «Відсутність термонапружень у неоднорідних тілах при заданих умовах нагрівання» отримано аналітичні вирази для характеристик матеріалу, які забезпечують нульові напруження у неоднорідних тілах простої форми (шар, порожнисті циліндр, куля) при заданих умовах нагрівання. Отримані точні аналітичні вирази з нелінійних диференціальних рівнянь для характеристик матеріалів, які забезпечують температурне поле, що не створює термонапружень у тілах простої форми, виготовлених з двоскладових функціонально-градієнтних матеріалів при відсутності об'ємних теплових джерел та з урахуванням узгодженості умов нагрівання на поверхнях.

У *п'ятому розділі* «Визначення температурних полів, які створюють цільові термонапруження в неоднорідних тілах» з урахуванням залежності теплофізичних характеристик матеріалу і температурного поля від координати визначено та проаналізовано термонапружені стани шару та порожнистих кулі і довгого циліндра. Температурні поля, які спричиняють заданий термопружний стан отримано із запропонованого інтегрального рівняння Фредгольма другого роду та виражено через радіальну компоненту тензора напружень, силові навантаження та характеристики матеріалів. Застосування квадратурних формул робить можливим отримання наближених розв'язків задач визначення напружень у багат шарових термочутливих неоднорідних у кожному шарі тіл простої форми з метою попередньої оцінки допустимих величин компонент тензора термонапружень і перевірки ефективності та правильності розв'язання обернених задач. Обчислено температурні поля в тілах простої форми з реальних матеріалів, які відповідають заданому розподілу компоненти тензора напружень. Цільовий розподіл радіальних напружень в умовах заданого теплообміну з середовищем можна забезпечити температурним полем, яке створюється тепловими джерелами.

У *шостому розділі* «Умови відсутності напружень і способи їх досягнення у довгому прямокутному брусі з характеристиками, залежними від двох координат» отримано точні вирази для температурного поля, яке не викликає напружень, через термомеханічні характеристики матеріалу. Отримано залежності між коефіцієнтами теплопровідності та лінійного теплового розширення для забезпечення температурного поля, яке не створює термонапружень у довгому прямокутному брусі у випадку відсутності об'ємних теплових джерел, а також встановлено умови нагрівання, при яких задача має точний аналітичний розв'язок. Розглянуто різні типи теплообміну з середовищем.

В останньому *сьомому розділі* «Умови відсутності напружень і способи їх досягнення у порожнистому циліндрі з характеристиками, залежними від двох координат» отримано вирази для температурного поля, яке не викликає

напружень і запропоновано способи його забезпечення за рахунок умов нагрівання з різними законами тепловіддачі при заданих характеристиках функціонування функціонально-градієнтних матеріалів та підбору характеристик матеріалу при заданих умовах тепловіддачі. Встановлено обмеження на характеристики функціонально-градієнтних матеріалів, при яких відповідна обернена задача визначення температурного поля, яке не спричиняє термонапружень має точний аналітичний розв'язок.

Основна частина роботи завершується загальними висновками, що відображають основні результати роботи. У додатки винесено вирази метричних тензорів та символів Крістоффеля для деяких криволінійних ортогональних систем координат та перелік друкованих праць здобувача і дані про апробацію результатів, наведених у дисертації.

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

1. Розроблені у роботі моделі та методи орієнтуються на забезпечення заданих розподілів компонент тензора напружень. Однак, для практичного використання результатів доцільніше було б забезпечити задані розподіли інженерних характеристик напруженого стану (максимальних дотичних напружень, головних напружень тощо).
2. Значну частину роботи присвячено розв'язуванню обернених задач термомеханіки. Однак, питання коректності таких задач та їх розв'язків практично не згадано. Було б доцільним проаналізувати цю проблему стосовно розглянутих задач.
3. У роботі зазначено, що для сталого коефіцієнта теплопровідності функціонально-градієнтного матеріалу вдається отримати аналітичні вирази характеристик матеріалів, що описані різними усередненими моделями. Втім, при визначенні умов створення температурного поля, яке не викликає напружень, мало уваги звернено на дослідження саме цього випадку.

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

Загальні висновки. В цілому дисертаційна робота Калиняка Б.М. є **завершеним науковим дослідженням**. У роботі вирішено важливу наукову проблему механіки деформівного твердого тіла, яка полягає у розробленні адекватних математичних моделей термопружності щодо встановлення фізично обґрунтованих способів теплового навантаження і критеріїв вибору пружних та теплофізичних характеристик матеріалів для забезпечення температурних полів, які з урахуванням відповідних умов силового навантаження чи закріплення спричиняють бажаний розподіл термонапружень у неоднорідних елементах конструкцій, зокрема їх відсутність. Тексти дисертаційної роботи та автореферату викладено на належному науковому та літературному рівні та подано згідно з вимогами до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук. Загальні висновки роботи повністю відповідають її меті.

Дисертаційна робота «Аналітичне визначення термосилових навантажень, які забезпечують цільові термонапружені стани у неоднорідних тілах» за актуальністю теми, обсягом, новизною та якістю наукових досліджень, теоретичним і прикладним значенням одержаних результатів, повнотою їх опублікування та якістю апробації, 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, Калиняк Богдан Миколайович, заслуговує присвоєння наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла.

Завідувач кафедри теоретичної
і комп'ютерної механіки
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
доктор фізико-математичних наук
професор



Володимир ЛОБОДА

Зовнішній секретар



Тетяна Хоракевич