

67-72-62/1  
29.04.16

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Яворського Назарія Борисовича "Моделі та методи проектування  
композиційних матеріалів з врахуванням теплофізичних характеристик"  
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.13.12 "Системи автоматизації проектувальних робіт"

### Актуальність теми

Дисертаційна робота Яворського Н. Б. "Моделі та методи проектування композиційних матеріалів з врахуванням теплофізичних характеристик" присвячена достатньо складним питанням проектування композиційних матеріалів з необхідними фізичними характеристиками. Враховуючи високу складність вирішення питання моделювання складних композиційних структур в умовах гетерогенності їх композицій очевидно є необхідність розроблення нових та вдосконалення існуючих моделей та методів моделювання та аналізу таких структур. Одним із важливих напрямків досліджень у разі розробки композиційних матеріалів із заданими фізичними характеристиками є дослідження, спрямовані на моделювання теплових процесів, зокрема в мікроелектроніці. Такі дослідження зумовлені швидким ростом обчислювальних потужностей різноманітних пристроїв та сенсорів, збільшенням потреби у такій техніці та відповідним збільшенням енерговитрат у процесі її роботи. Застосування композиційних матеріалів з необхідними теплофізичними характеристиками дає змогу підвищити надійність кінцевих мікроелектронних приладів, тривалість їх безперебійної роботи, знизити енерговитрати на охолодження тощо.

Сучасний розвиток систем IoT, широке впровадження в різні сфери життя «розумних» речей зумовлює актуальність розробки надійних, енергоефективних мікроелектронних приладів, що вимагає в першу чергу створення та дослідження моделей композиційних матеріалів, які є найвідповідальнішою та найскладнішою частиною такої задачі.

Дослідження моделей композиційних матеріалів спрямовані, з одного боку, на покращення структурних, фізико-хімічних та механічних властивостей матеріалів у відповідності до області використання, з іншого – на підвищення технологічних, економічних та екологічних показників кінцевих конструкцій.

Розв'язок задачі створення композиційних матеріалів із наперед заданими структурними, фізико-хімічними та механічними властивостями є не дослідженим у повному обсязі саме через надвисоку обчислювальну її складність. Шлях удосконалення процесу вирішення цієї задачі полягає у створенні ефективних математичних методів та моделей дослідження властивостей матеріалів, які давали змогу знизити складність обчислень, у поєднанні із застосуванням сучасних потужних засобів паралельної та продуктивної обробки інформації.

З метою зниження складності обчислень під час проектування заданих характеристик композиційних матеріалів виділять як основне завдання вивчення взаємозв'язку "склад – структура – характеристики". Знаходження ефективних, певним чином усереднених характеристик є трудомісткою задачею, яку розв'язують або спираючись на небажані, складні та економічно-затратні натурні експерименти, або на чисельно-аналітичні методи, де обчислення проводять на основі обернених задач провідності. У певних випадках вдається вивести наближені емпіричні та напівемпіричні формули, а для тривіальних структур



матеріалів вдаються до аналізу фізичних процесів у їх спрощених квазіоднорідних моделях. Основні труднощі виникають у разі синтезу характеристик матеріалів складної структури через значний вплив неоднорідності їх середовища на процеси, які моделюються. Наявність неоднорідності вимагає високого рівня деталізації фізико-математичних моделей та передбачає ітераційні обчислення і призводить до збільшення складності алгоритмів на порядок.

Виходячи з цього, дисертаційна робота Яворського Н.Б. ставить за мету розв'язок актуального завдання вдосконалення мікрорівневих моделей та числових методів знаходження теплофізичних характеристик композиційних матеріалів складної структури, а також їх реалізацію як підсистеми визначення заданих характеристик у складі системи автоматизованого проектування, яка застосовує технології розподілених і паралельних обчислень.

#### **Відповідність спеціальності**

Робота відповідає паспорту спеціальності 05.13.12 – "Системи автоматизації проектувальних робіт", а саме п.: "Математичне моделювання й аналіз технічних об'єктів у САПР, зокрема методи ідентифікації об'єктів, декомпозиція та макромодельовання, числово-аналітичні методи аналізу об'єктів на мікро- та макрорівнях, моделювання логічних і функціональних схем дискретних пристроїв".

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри "Системи автоматизованого проектування" Національного університету "Львівська політехніка" та безпосередньо пов'язана з планами наукових досліджень у рамках міжнародних наукових проєктів: "EduMEMS – Developing Multidomain MEMS Models for Educational Purposes" (FP7-PEOPLE-2010-IRSES № 269295) та ТЕМПУС "MastMST – Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design" (530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR).

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

На основі використання коміркових моделей розвинуто методи моделювання складних мікрорівневих композиційних структур.

Вперше розроблено метод моделювання випадкових перехідних шарів між фазами композиції, який базується на використанні випадкових скалярних полів та алгоритму маскування.

На основі методу скінченних елементів розвинуто моделі аналізу зв'язаних теплофізичних процесів у складних мікрорівневих структурах композиційних матеріалів.

На основі використання теорії подібності та методу теплоелектричних аналогій вдосконалено методи знаходження ефективних теплофізичних характеристик композитів: коефіцієнту теплопровідності, модуля пружності, коефіцієнту Пуассона та температурного коефіцієнту лінійного розширення.

#### **Практична цінність результатів**

Розроблені ефективні алгоритми та програмні компоненти, які застосовують технології розподілених і паралельних обчислень та дозволяють реалізувати запропоновані в роботі



моделі мікрорівневих структур, чисельні методи знаходження ефективних теплофізичних характеристик композиційних матеріалів складної структури, і становлять практичну цінність.

Отримані нові наукові результати знайшли практичне застосування, що підтверджується доданими до дисертації актами впровадження.

Отримані автором наукові результати є основою для подальшого розвитку моделей та методів проектування композиційних матеріалів із заданими характеристиками з можливістю їх застосування у задачах проектування складних конструкцій. Запропоновані математичні методи та моделі можуть бути застосованими або адаптованими у разі проведення досліджень широкого кола гетерогенних структур як природного так і штучного походження.

#### **Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій**

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації обґрунтовуються:

- обраними методами дослідження;
- коректним застосуванням математичного апарату;
- коректним визначенням потрібних програмних засобів та технологій для реалізації запропонованих алгоритмів;
- узгодженням результатів з результатами аналогічних систем та відомими натурними експериментами;
- апробацією та позитивними відгуками на наукових семінарах та конференціях.

#### **Повнота викладу основних результатів у наукових фахових виданнях**

Загалом результати досліджень достатньо повно висвітлені у наукових друкованих виданнях. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 12 наукових праць. Наявні 2 статті у фахових українських виданнях та 3 у зарубіжних, що індексуються науково-метричними базами. Апробація здійснювалася на міжнародних наукових конференціях, де робота отримала схвальні відгуки.

#### **Короткий зміст роботи і її аналіз**

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел обсягом 166 найменувань та додатку, який містить акти впровадження результатів роботи. Загальний обсяг роботи складає 162 сторінки, що включають 131 сторінку основного тексту, 29 рисунків, 4 таблиці.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі, наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проведено аналіз задачі знаходження ефективних характеристик композиційних матеріалів під час їх проектування на основі математичного апарату числового моделювання теплофізичних процесів. Ключовим етапом задач проектування композиційних матеріалів є етап побудови моделей знаходження заданих, певним чином усереднених шляхом гомогенізації, характеристик у вигляді залежності від структурних



параметрів композиції. Проаналізовано вплив структури матеріалів на їх фізичні характеристики, а також переваги та недоліки основних моделей структури та методів знаходження характеристик. Розглянуто особливості застосування числових методів моделювання фізичних процесів для знаходження ефективних характеристик мікрорівневих моделей композитів. В основу покладено методи числового моделювання натурних експериментів в елементарних об'ємах, які описують складну мікрорівневу структуру композиту.

У **другому розділі** описано методологічні основи задачі знаходження ефективних характеристик композиційних матеріалів зі складною структурою під час їх проектування з допомогою числового моделювання теплофізичних процесів.

Досліджено методи моделювання мікроструктур композиційних матеріалів. Задача моделювання структури композиту вирішується на основі використання методів Монте-Карло для побудови елементарних об'ємів у формі примітивних детермінованих включень, випадкових комірок, та регулярних комірок. Враховуючи складність мікроструктур композитів, елементарні об'єми представлено у вигляді регулярних комірок, належність до фази матеріалу яких задається випадковою функцією. Це дозволило досліджувати такі складні мікроструктури, які описуються полями Гауса (компоненти композиту, які взаємно проникають, перехідні шари армування, тощо).

Досліджено аналітичні фізико-математичні моделі теплофізичних процесів у неперервних середовищах, які базуються на математичній теорії поля та феноменологічному підході, що дало змогу описати базові диференціальні рівняння балансу, як основу для проведення числових експериментів.

Досліджено способи використання числових методів для наближеного розв'язку фізико-математичних задач та ґрунтовно обрано метод скінченних елементів, який поєднує переваги проєкційних та сіткових числових методів та уніфікує процес моделювання теплових та зв'язаних з ними механічних процесів у мікроструктурах композитів.

Досліджено способи використання методів аналогій та теорії подібності в моделюванні фізичних процесів та запропоновано метод теплоелектричних аналогій, який застосовує виявлену подібність моделей, яка ґрунтується на системі аналогічних елементів із зосередженими фізичними параметрами. Завдяки цьому можна формально уніфікувати алгоритми синтезу ефективних характеристик композиційних матеріалів шляхом проведення ряду числових експериментів.

Визначена паралельність за даними дозволяє застосувати технології паралельних і розподілених обчислень у процесі проектування заданих теплофізичних характеристик композитів та обрати технологію OpenCL для реалізації запропонованих алгоритмів.

**Третій розділ** присвячено розв'язуванню поставленої у роботі задачі вдосконалення числових моделей та методів знаходження ефективних теплофізичних характеристик композиційних матеріалів у процесі їх автоматизованого проектування.

Розвинуто методи синтезу мікрорівневих структур композиційних матеріалів на основі регулярних коміркової моделі. Модель елементарного об'єму структури композиційного матеріалу представляється у вигляді тривимірної матриці скалярних інтенсивностей. Відповідно до класифікації композиційних матеріалів за різновидами компонентів армування, запропоновано та обґрунтовано такі методи побудови мікрорівневих моделей структури: генерування випадкових еліпсоїдних включень; генерування випадкових



волокнистих включень; генерування випадкових коміркових моделей; вперше, генерування функціонально-градуйованих перехідних шарів. Використання у якості елементарного об'єму матриці інтенсивностей дає змогу одночасно використовувати в моделях усі описані методи генерування мікроструктури композитів та їх комбінації, а також саму матрицю безпосередньо у якості дискретизації, що дозволило здійснити декомпозицію обчислень та значно зменшити їх кількість.

На основі методу скінченних елементів дістали подальшого розвитку числові моделі теплофізичних процесів, що розглядаються у складних мікрорівневих структурах композиційних матеріалів. Завдяки формальному об'єднанню лінійних стаціонарних задач теплопровідності та пружності методом скінченних елементів у формулюванні зважених нев'язок з'явилася можливість враховувати комплексні крайові умови та досліджувати теплофізичні процеси в складних композиційних структурах.

На основі застосування теорії подібності та методу теплоелектричних аналогій до розробленої скінченно-елементної моделі композитів, розроблено методи знаходження ефективних теплофізичних характеристик: коефіцієнту теплопровідності, модуля пружності, коефіцієнту Пуассона та температурного коефіцієнту лінійного розширення. Для знаходження ефективних теплофізичних характеристик композитів складної структури запропоновано та обґрунтовано використання елементів теплоелектричної аналогії та застосування у процесі проектування результатів числового моделювання. Отримані вирази дають змогу формалізувати критерії, які визначають отримання заданих характеристик, та розв'язувати відповідні задачі проектування композитів.

**Четвертий розділ** описує практичні результати дисертаційної роботи. Розділ присвячено реалізації програмного забезпечення з допомогою технології паралельних і розподілених обчислень OpenCL для розроблених методів синтезу структури композиційних матеріалів, числового аналізу теплофізичних процесів у цих структурах та знаходження заданих теплофізичних характеристик. Досліджено адекватність, збіжність та точність розроблених і реалізованих моделей та методів на основі проведення апостеріорних оцінок і серій числових експериментів з їх порівнянням з результатами проектування за допомогою аналогічної системи та натурними експериментами.

Порівнянням результатів моделювання з натурними експериментами, приймаючи результати останніх за точні, встановлено, що відносна похибка знайдених ефективних характеристик не перевищує 1%.

На прикладі використання технології OpenCL розроблено алгоритми та програмні компоненти, які реалізують алгоритми побудови мікрорівневих структур композиційних матеріалів з компонентами армування у формі випадкових еліпсоїдних включень, скалярних випадкових полів та випадкових функціонально-градуйованих перехідних шарів.

**Розділи дисертації** є логічно пов'язаними, висновки узгоджені між собою та з поставленими задачами.

#### **Відповідність змісту автореферату положенням дисертації**

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



## **Виявлені зауваження до роботи**

Робота в цілому виконана на високому науковому рівні, однак:

1. Автор, зосередивши в роботі основну увагу на математичному забезпеченні САПР, зовсім опустив висвітлення інших видів забезпечення, зокрема не представлено алгоритмічне забезпечення, яке є дуже важливим через необхідність застосування паралельних та розподілених обчислень, не наведена структура САПР проектування заданих характеристик композиційних матеріалів, не визначено, які види забезпечення входять до його складу.
2. Не зрозуміло, чому у роботі (розділ 2.5) раптом проведено огляд неповний огляд Grid, HPC та інших систем, які застосовують для паралельних та розподілених обчислень, а потім зроблено мало обґрунтований висновок про необхідність застосування технології OpenCL. Ці технології застосовують для зовсім різних класів задач.
3. Невизначеність самої САПР, до складу якої потрібно включити запропоновані програмні рішення, є джерелом багатьох питань, не висвітлених у роботі.
4. У роботі досліджено теплофізичні процеси та відповідні їм характеристики композитів, що моделюються лінійними стаціонарними фізико-математичними задачами, але не показано як ними можна описувати більш широке коло нелінійних та нестационарних процесів.
5. У другому розділі описано метод побудови гетерогенних композиційних структур на основі побудови випадкових скалярних полів, однак не досліджено вплив обраної функції розподілу випадкової величини на побудовані моделі структури композитів, а також варіанти її реалізації у програмному забезпеченні САПР.
6. Викликає певний подив такий високий рівень збіжності між натурними та чисельними експериментами – похибка дорівнює 1%.
7. Автор достатньо вільно використовує термін оптимальний, в роботі не має чіткої постановки та вирішення задачі оптимізації, а натомість йдеться про більш точне знаходження заданих теплофізичних характеристик композиційних матеріалів менш затратними математичними методами.
8. Є деякі не чітко роз'яснені терміни, які використано у роботі, зокрема не зовсім чітко зрозуміло, що таке поняття «доменна декомпозиція», які процедури воно визначає під час проектування і на якому рівні.
9. Впровадження в роботі виконано тільки у вигляді навчальних курсів, хоч запропоновані програмні рішення можливо було б апробувати десь експериментально.

Разом з тим, зауваження до роботи не торкаються суті отриманих нових результатів і не знижують загальної позитивної оцінки наукової і практичної цінності дисертації Яворського Н.Б.

## **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Яворського Н.Б. "Моделі та методи проектування композиційних матеріалів з врахуванням теплофізичних характеристик" є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності дають змогу вирішити



актуальне завдання вдосконалення мікрорівневих моделей та методів ефективного знаходження заданих теплофізичних характеристик композиційних матеріалів у процесі їх автоматизованого проектування.

Робота відповідає паспорту спеціальності 05.13.12 – "Системи автоматизації проектувальних робіт" та вимогам, які висуваються до кандидатських дисертацій, зокрема п. 11 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", а співшукач Яворський Н.Б. заслуговує присвоєння йому наукового ступеня кандидата технічних наук за вказаною спеціальністю.

**Офіційний опонент**

завідувач кафедрою інформаційно-телекомунікаційних мереж Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут",  
доктор технічних наук, професор

Глоба Л. С.

Підпис проф. Глоби Л.С. засвідчую:

Вчений секретар  
Національного технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут",



А.А. Мельниченко