

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,

Суворової Ірини Георгіївни

провідного наукового співробітника відділу нетрадиційних енерготехнологій

Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

на дисертаційну роботу

Кобильської Олени Борисівни

«Математичне та комп'ютерне моделювання

теплових процесів у складних системах з рухомими

та нерухомими осесиметричними елементами», що подана на здобуття

наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Дисертаційна робота Кобильської О.Б. присвячена математичному та комп'ютерному моделюванню процесів теплообміну у складних системах на основі нелінійних крайових та нелокальних задач зі складними умовами теплообміну на граничних поверхнях.

Метою дослідження є підвищення ефективності контролю температури у складних технологічних процесах металургії (прокатка, термічна обробка), електромеханіки, де мають місце складні умови теплообміну між багат шаровими рухомими та нерухомими елементами на граничних поверхнях, за рахунок побудови нових та удосконалення існуючих математичних моделей процесів теплообміну, розробки ефективних методів розв'язання крайових, нелокальних та обернених задач для визначення основних параметрів керування температурними полями.

В роботі, вперше сформульовано єдиний підхід до побудови нових та вдосконалення існуючих математичних моделей теплових процесів у складних системах, що включають у себе багат шарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та не щільному контакті шарів осесиметричної форми, що нагріваються або охолоджуються. Та вперше запропоновано метод розв'язання крайових задач для рівняння теплопровідності у складній системі за допомогою введення умов імпедансного типу при наявності невизначеності однієї з граничних умов на межі.

I. Актуальність теми дисертаційної роботи

Процес побудови адекватних моделей теплових процесів, які відбуваються в складних системах у металургії (прокатні стани), при термічній обробці металів, в електричних машинах, в обладнанні для 3-D друку, надає широкі можливості для вивчення властивостей систем і принципів теплообміну з навколишнім середовищем. Наукові досягнення в області математичного моделювання процесів теплообміну у складних системах здебільшого базуються на крайових задачах для рівняння теплопровідності, які описують теплообмін між нерухомими елементами складної системи. Мало розглядаються моделі теплообміну у складних системах з рухомими елементами та, в яких використовуються нелокальні умови. Також треба відмітити, що недостатньо досліджені можливості застосування нелокальних задач, інтегральних умов та більш складних умов імпедансного типу у математичних моделях теплообміну у рухомих елементах та системах в цілому.

Таким чином: модифікація та узагальнення існуючих математичних моделей температурних розподілів у рухомих елементах та системах з різними умовами теплообміну складних з геометричної точки зору багат шарових областях; розробка нових методів розв'язання нелінійних крайових та нелокальних задач для таких моделей; залучення ефективних алгоритмів розв'язання прямих та обернених задач та визначення параметрів керування процесами теплообміну, є актуальною проблемою, що і визначило тему даної дисертаційної роботи.

II. Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Текст дисертації складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (300 найменувань на 35 сторінках) та двох додатків. Загальний обсяг дисертації – 316 сторінок, включаючи 265 сторінок основного тексту, 9 таблиць та 58 рисунків; обсяг додатків – 12 сторінок.

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, викладені основні одержані результати, з'ясовані їх наукова новизна та практична цінність, наведені відомості про публікації та апробацію роботи.

У першому розділі наведено аналіз сучасних фізичних та математичних моделей теплових процесів у складних системах з багат шаровими рухомими та нерухомими елементами осесиметричної форми, з нагріваючим або охолоджуючим зовнішнім або внутрішнім джерелом тепла і з залежністю температурного поля від кута обертання елементів навколо своєї осі та

складних умов теплообміну поверхні з навколишнім середовищем.

Доведено необхідність побудови нових математичних моделей для розрахунків температурних розподілів у складних системах та їх конструктивних елементах, таких як прокатний стан чи електричні машини з складною геометричною формою. Пропонуються математичні моделі теплових процесів в елементах машин і механізмів складних систем під час технологічних операцій термоциклічної обробки (ТЦО) та електропластичного волочіння (ЕПВ) у вигляді крайових, початково-крайових та нелокальних задач для рівняння теплопровідності.

В розділі обґрунтовано необхідність побудови математичних моделей теплових процесів у стрічці та дроті під час електропластичної та термопластичної обробки виробів внутрішніми та зовнішніми джерелами тепла, а також постановки обернених задач для визначення параметрів керування температурними полями.

Для формулювання уточнення математичної моделі теплових процесів, зокрема, керуючи параметрами теплового процесу підтримувати необхідну температуру в усіх точках області, що нагрівається, необхідно введення інтегральної умови, яка визначає баланс тепла області нагрівання або охолодження.

У другому розділі побудовані математичні моделі процесів теплообміну в осесиметричних елементах систем, що відбуваються під дією зовнішніх та внутрішніх джерел тепла. Запропоновані нелокальні інтегральні умови, що з фізичної точки зору свідчать про баланс енергії в області нагрівання. В залежності від характеру джерел тепла енергія може виділятися всередині області або підводитись до неї із зовні.

На основі порівняльного аналізу температурних розподілів зроблено висновок, що уведення нелокальної інтегральної умови балансу тепла у крайову задачу для рівняння теплопровідності, дозволяє зробити уточнення при формулюванні математичних моделей процесів теплообміну. Це дозволяє, керуючи параметрами теплового процесу, підтримувати необхідну температуру в усіх точках області, що нагрівається. Це також дає змогу визначити параметри керування температурними розподілами для підвищення ефективності контролю температури в складних системах.

На прикладі дослідження технологічного процесу відпалу мідного дроту показано, що як математичну модель теплового процесу в осесиметричних елементах складних систем доцільно використовувати нелокальну задачу з інтегральною умовою теплового балансу.

У третьому розділі розглянуто та удосконалено математичні моделі теплових процесів, які протікають під час імпульсної обробки виробів осесиметричної форми внутрішніми та зовнішніми джерелами тепла. Моделі

враховують складні умови теплообміну у початково-крайових і нелокальних задачах і дозволяють знаходити оптимальне поєднання параметрів режимів імпульсної обробки із заданим градієнтом нагріву і охолодження та підвищити ефективність контролю температури.

Вперше запропоновано метод відновлення внутрішнього періодично діючого джерела тепла в задачі теплопровідності з інтегральною умовою, де у якості додаткової інформації використана температурна функція, яка знайдена із інтегральної умови балансу тепла.

У розділі розглядається математична модель температурного та напруженого стану рухомого ізотропного осесиметричного середовища з періодично діючим імпульсним джерелом тепла. Процеси, що відбуваються у тонкому рухомому дроті під час електропластичної деформації описуються системою крайових задач для диференціальних рівнянь теплопровідності і термопружності. Вивчені особливості впливу імпульсних джерел тепла на розподіл температур, напружень та переміщень. Досліджені розподіли цих показників під час пропускання імпульсів струму, та під час електропластичної деформації.

Четвертий розділ присвячено математичним моделям теплових процесів у багат шарових неканонічних областях в валкових кристалізаторах. В розділі розглянуто математичні моделі теплових процесів в металургії, що відбуваються у складних системах з рухомими та нерухомими елементами при щільному та нещільному контакті шарів осесиметричної форми. У математичній моделі враховані різні умови теплообміну внутрішньої та зовнішньої поверхонь валка зі стрічкою та навколишнім середовищем.

В розділі розглянуто методи побудови умов імпедансного типу для однорідного рівняння теплопровідності у двошаровій циліндричній області на межі розділу середовищ з різними теплофізичними характеристиками.

Температурне поле циліндричного валка з стійким покриттям розглянуто у вигляді температурного поля двошарового циліндра. Побудована математична модель у вигляді крайової задачі для рівняння теплопровідності з умовами імпедансного типу на межі двох шарів циліндра при щільному контакті.

Побудована математична модель температурного розподілу процесу гарячого спікання виробів у двошаровому контейнері циліндричної форми. У внутрішньому циліндрі отримана гранична умова імпедансного типу.

Побудована математична модель температурного поля складної системи: екструдер, нагрівник, полімерна нитка у вигляді крайової задачі для рівняння теплопровідності з додаванням відповідних крайових та нелокальної інтегральної умови в рухомому циліндрі, що розігрівається в обмеженій області – екструдері зовнішніми джерелами тепла. Розв'язання задачі дозволило визначити основні параметри керування температурним полем

дроту (стренги) із полімерного матеріалу, що розігрівається в екструдері до температури розм'якшення під час адитивного друку тривимірних деталей або їх фрагментів згідно технології FDM (fused deposition modeling).

У п'ятому розділі побудовані математичні моделі теплових процесів, що відбуваються у складних багатошарових областях (електричних машинах) при щільному та нещільному контакті шарів, які враховують різні закони теплообміну на межі розділу шарів, що залежать від кута повороту елемента навколо своєї осі і дозволяють розраховувати температуру окремих елементів виробів.

Вперше сформульовано єдиний підхід побудови математичних моделей теплових процесів у складних системах, що включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та нещільному контакті шарів осесиметричної форми, що нагріваються та охолоджуються з врахуванням залежності температурного поля елементів від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з навколишнім середовищем.

Запропоновано континуальний підхід до дослідження температурних розподілів у складній електромеханічній системі як електрична машина. Побудована математична модель та розв'язана крайова задача для неоднорідного рівняння теплопровідності у складній циліндричній області, яка утворена перетином трьох циліндрів, два з яких кругові, третій з основою у вигляді «пелюсткової троянди» і мають спільну вісь симетрії. Проведено чисельні розрахунки та порівняння отриманих температур з результатами натурального експерименту. Побудовані графіки температурних розподілів.

III. Наукова новизна роботи

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримано нове рішення важливої науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці, узагальненні та розвитку теоретичної основи математичного і комп'ютерного моделювання процесів теплообміну у складних системах. Останні включають у себе багатошарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та не щільному контакті шарів осесиметричної форми, що нагріваються зовнішніми або внутрішніми джерелами тепла або охолоджуються і враховують залежність температурного поля від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з оточуючим середовищем.

Отримане рішення відрізняється від існуючих рішень більш повним відображенням процесів теплообміну, розробкою нових обчислювальних методів розв'язання початково-крайових, нелокальних задач у складних системах на основі сучасних технічних та інформаційних засобів та методів

програмування, що дозволяє підвищити ефективність контролю температури в складних системах.

У межах запропонованого напрямку на основі сформованих принципів побудови нових та удосконалення існуючих математичних моделей та методів розв'язання задач одержано наступні наукові результати:

сформульовано єдиний підхід до побудови нових та вдосконалення існуючих математичних моделей теплових процесів у складних системах, що включають у себе багат шарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та не щільному контакті шарів осесиметричної форми, що нагріваються або охолоджуються, який відрізняється від аналогічних підходів врахуванням залежності температурного поля елементів від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з оточуючим середовищем, що дозволяє підвищити ефективність контролю температури в складних системах та їх елементах;

запропоновано метод розв'язання крайових задач для рівняння теплопровідності у складній області – багат шаровому циліндрі, де в одній частині шарів діють внутрішні джерела тепла, а у іншій – зовнішні, який, за рахунок усереднення температурних розподілів за радіусом у внутрішніх шарах в умовах невизначеності однієї з граничних умов на межі шарів, за допомогою введення умов імпедансного типу дозволяє підвищити точність чисельних розрахунків та ефективність контролю температури в складних системах.

Удосконалено математичні моделі теплових процесів, що відбуваються у складних багат шарових областях при щільному та не щільному контакті шарів які, на відміну від існуючих, враховують різні закони теплообміну на межі розділу шарів, що залежать від кута повороту елемента навколо своєї осі і дозволяють розраховувати температуру окремих елементів виробів, що сприяє підвищенню ефективності контролю температури в складних системах та методи розв'язку обернених крайових задач теплопровідності які, на відміну від існуючих, враховують змінні граничні умови, застосовують інтегральну умову балансу тепла для побудови розв'язку, що дає можливість розширити коло застосувань методів розв'язання обернених задач, що в свою чергу дозволило підвищити ефективність контролю температури в складних системах.

IV. Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні ряду математичних моделей та програмних модулів, що мають можливість адаптації до дослідження різних складних систем та можливість використання в системах керування процесами виготовлення дроту. Розроблені методи і засоби розв'язання задач були використані під час розробки технологічного обладнання процесів спікання, гарячого пресування та високотемпературної деформації виробів канонічної та неканонічної форми із порошкових матеріалів для прогнозування перебігу пожежі і розрахунків температур в

складних системах, що підтверджено актами впровадження фірми «Карма» та фірми «Neutronic».

Отримані в процесі досліджень теоретичні положення можуть бути використані у подальшому як при поглибленому вивченні теорії математичних моделей, нелокальних задач, різницевих методів, так і в практичній діяльності при побудові систем керування процесами нагріву рухомих та нерухомих виробів з діючими внутрішніми та зовнішніми джерелами тепла, аналізу температурних розподілів виробів складної форми. Отримані результати використані при викладанні курсів «Чисельні методи», «Рівняння з частинними похідними», «Рівняння математичної фізики», «Моделювання природничих та технологічних процесів» та інших у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського.

V. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів

Достовірність і точність результатів, отриманих у дисертаційній роботі, базується на використанні методів математичного моделювання та апарату математичної фізики, забезпечується чисельними експериментами, відповідністю моделей, технологічним і фізичним процесам, результатами досліджень інших авторів та результатами натурних експериментів. У таблицях 2.1, 3.1, 4.1, 5.1, 5.2 наведені температурні значення чисельних і натурних експериментів різних теплових процесів, що розглядаються в дисертаційній роботі. Є актами впровадження (Додаток 1-3).

VI. Повнота викладених наукових положень та висновків

Матеріали дисертації опубліковані в 58 наукових працях: з них 3 закордонні колективні монографії [1–3], 11 включені до міжнародних наукометричних баз SCOPUS та Web of Science [13, 19, 23, 25–31] (<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=48361287400>), 20 статей у фахових виданнях України, 35 публікацій у збірниках матеріалів конференцій [25–58], одноосібних публікацій 5.

Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли повне відображення в наукових виданнях.

Автореферат у повній мірі відбиває основні положення та отримані автором результати досліджень.

VII. Оформлення дисертації

Дисертація є закінченою працею, що виконана у вигляді підготовленого рукопису. Дисертація оформлена згідно вимог до оформлення. Стиль викладання наукового матеріалу забезпечує його чітке та однозначне

розуміння. Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації та повністю висвітлює отримані автором результати досліджень і висновки роботи.

VIII. Зауваження до дисертації

1. Не зовсім зрозуміло в роботі, з яких фізичних міркувань під час постановки задач вибирається такий параметр теплового процесу, як сила струму і його залежність від часу?
2. Для яких технологічних процесів було досягнене керування тепловим процесом?
3. В розділі 2 під час визначення невідомих теплофізичних характеристик в задачі теплопровідності використовується умова для нев'язки $|\xi_j| \leq \delta$. Незрозуміло, із яких міркувань обирається критерій δ для нев'язки?
4. В розділі 3 представлена математична модель теплового процесу, що відбувається під дією внутрішніх і зовнішніх періодично діючих джерел тепла. Вважаю за доцільне більш детально розглянути технологічний процес, що описується такою моделлю.
5. Слід пояснити, яку роль відіграє умова імпедансного типу в технологічних процесах і в якому випадку доцільно вводити її у математичну модель?

Вказані зауваження варті обговорення під час захисту і не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

ВИСНОВОК

На підставі вищевикладеного, вважаю, що дисертаційна робота Кобильської Олени Борисівни «Математичне та комп'ютерне моделювання теплових процесів у складних системах з рухомими та нерухомими осесиметричними елементами» є завершеною науковою працею, в якій на основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень отримано нове рішення важливої науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці, узагальненні та розвитку теоретичної основи математичного і комп'ютерного моделювання процесів теплообміну у складних системах. Останні включають у себе багаточарові рухомі та нерухомі елементи при щільному та не щільному контакті шарів осесиметричної форми, що нагріваються зовнішніми або внутрішніми джерелами тепла або охолоджуються і враховують залежність температурного поля від кута обертання елементів навколо своєї осі та складних умов теплообміну поверхні з оточуючим середовищем.

Зазначені зауваження не вплинули на якість дисертаційної роботи, не зменшили її наукового та практичного значення.

Це дає змогу зробити висновок про те, що дисертаційна робота «Математичне та комп'ютерне моделювання теплових процесів у складних

системах з рухомими та нерухомими осесиметричними елементами» повністю відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.13 р. №567, її автор, Кобильська Олена Борисівна, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

**Офіційний опонент,
провідний науковий співробітник відділу
нетрадиційних енерготехнологій
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України
доктор технічних наук, професор**

І.Г. Суворова

Підпис доктора технічних наук, професора
Суворової І. Г. засвідчую.
Учений секретар Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
д-р. техн. наук



К.В. Максименко-Шейко