

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г.В.КАРПЕНКА

На правах рукопису

СІКОРА Оксана Володимирівна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ І
ТЕРМОПРУЖНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЕРМОЧУТЛИВИХ СИСТЕМАХ

Спеціальність: 05.13.02 - математичне моделювання в
наукових дослідженнях

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

001:51

ДВ 36.75

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Львівському національному університеті імені Стефаника

Науковий керівник - доктор фізико-математичних наук,

ЛНУ України ім.В.Стефаника



00760843 (S)

Науковий консультант - кандидат фізико-математичних наук,

старший науковий співробітник

ІВАНІК Євгеній Григорович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор

СЕМЕРАК Михайло Михайлович

- доктор фізико-математичних наук,

професор ОГІРКО Ігор Васильович

Провідна установа - Інститут математики НАН України

Захист відбудеться " 25 " лютого 1997 р. о 15⁰⁰ год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 04.01.02 при Фізико-механічному інституті ім. Г.В.Карпенка НАН України (290601, Львів-53, МСП, вул.Наукова, 5).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту (290601, Львів-53, МСП, вул.Наукова, 5).

Автореферат розісланий " 24 " січня 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук, старший науковий

співробітник



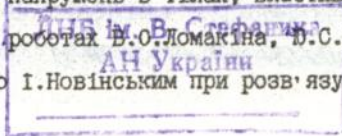
БУНЬ Р.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Метод моделювання фізичних і, зокрема, технологічних процесів є ефективним засобом вивчення закономірностей, що керують ними, або прогнозування результатів процесу в залежності від керуючих параметрів. Цей метод включає розробку математичної моделі процесу, що відображає найсуттєвіші його особливості та проведення числового експерименту на ЕОМ, який відтворює, по можливості, весь процес або окремі його етапи.

Сучасні конструкційні матеріали, які застосовуються як складові елементів і вузлів агрегатів енергетичної, транспортної, авіаційної та іншої техніки, зазнають в процесі виготовлення чи експлуатації дії теплових впливів. З одного боку створення і освоєння нових технологічних процесів, які супроводжуються значними тепловими ефектами, з другого - широке застосування з якості конструкційних нових нетрадиційних матеріалів, з розширеними фізико-механічними властивостями, а також сучасний стан розвитку техніки не дає змоги нехтувати впливом температури на параметри матеріалів, користуючись лінійним описом теплового балансу. Тому розробка узагальнюючих методів розв'язування крайових задач для вирішення проблеми математичного моделювання теплових і термопружних процесів в термочутливих кусково-однорідних тілах, на підставі чого можна було б прогнозувати поведінку реальних конструкційних систем під дією зовнішніх теплових навантажень, є актуальною.

Різноманітні методи розв'язування нелінійних задач теплопровідності однорідних тіл широко висвітлені в працях А.О.Березовського, Л.М.Березовської, Л.О.Коздоби. Значний розвиток отримали методи дослідження температурних напружень в тілах, властивості яких залежать від температури, в роботах В.О.Ломакіна, В.С.Постольника. Метод збурень застосовано І.Новінським при розв'язуван-



ні квазістатичних задач термопружності термочутливих ізотропних тіл. В працях Я.С.Підстригача, Ю.М.Коляно та їх учнів розвинуто метод узагальнених функцій, заснований на апроксимації кривих залежності механічних характеристик термочутливого матеріалу від температури. Б.О.Поповим розроблено методи обчислення на ЕОМ математичних функцій шляхом їх рівномірної апроксимації сплайнами. Увагу питанням визначення термопружного стану та встановленню умов оптимального нагріву оболонок з врахуванням температурної залежності характеристик приділено в роботах Я.М.Бурака та І.В.Огірко.

Прогресивні тенденції в практиці теплофізичних досліджень, проектування теплозахисних систем, теплообмінних конструкцій і апаратів на основі застосування нових синтетичних матеріалів з анізотропією фізико-механічних властивостей потребують знання теплофізичних характеристик (ТФХ) та термопружних характеристик (ТПХ). Крім того, як відзначають Ю.М.Мацевитий і С.Ф.Лушпенко, визначення ТФХ тими чи іншими методами, зокрема методами обернених задач, як правило, не є самоціллю: ці характеристики використовуються далі при одержанні розв'язків прямих задач теплопровідності. Найбільш важливою областю використання точних розв'язків просторових та двомірних нестационарних задач теплопровідності і квазістатичних задач термопружності є область експериментальної термомеханіки, яка спрямована на дослідження ТФХ і ТПХ ізотропних та анізотропних середовищ, і тому розвиток методів неруйнівного контролю для визначення цих характеристик представляє в зв'язку з цим важливу науково-технічну проблему.

Виходячи з викладеного вище можна констатувати, що широке використання в різних областях техніки тіл з розривними параметрами (просторової кусково-однорідної структури - термочутливі тіла з порожниною, та термочутливі кусково-однорідні системи), обу-

мовляв необхідність створення нових і удосконалення вже існуючих методів розрахунку їх теплового і термопружного стану.

Проведений комплекс досліджень по дисертації виконувався в рамках теми " Розробити методи розв'язку крайових просторових задач термомеханіки, що приводяться до систем диференціальних та інтегродиференціальних рівнянь з розривними та сингулярними коефіцієнтами ", виконуваної у відділі термомеханіки Інституту прикладних проблем механіки і математики ім.Я.С.Підстригача НАН України за постановою Президії АН України № 1744 від 29.12.89 р. та проекту " Моделювання механічної поведінки матеріалів з ефектом пам'яті форми, проектування і розробка виконувачів елементів приводу і давачів температури " ДНТІ " Створення нових матеріалів з особливими властивостями, обумовленими фазовими, зокрема мартенситними перетвореннями".

Об'єктом дослідження є математичні моделі опису теплового і термопружного стану термочутливих систем. Предметом дослідження є методи побудови математичних моделей у вигляді крайових задач математичної фізики та розробка аналітично-числових методів їх розв'язання.

Мета роботи. Створення методів та засобів математичного моделювання теплових і термопружних процесів в ізотропних та анізотропних тілах з розривними параметрами, а також методики верифікаційного контролю визначення комплексу ТФХ і ЛФХ ізотропних та ортотропних матеріалів.

Досягнення поставленої мети здійснюється шляхом розв'язання таких задач:

- розробка підходу до побудови моделей опису стаціонарного теплового стану однорідних термочутливих тіл з порожнинами, нестаціонарних теплових процесів в однорідних термочутливих тілах та квазістаціонарних теплових процесів в ортотропних

термочутливих тілах при дії рухомих зосереджених теплових факторів та областей нагріву;

- побудова розв'язків прикладних задач статичної термопружності кусково-однорідних термочутливих сферичних і біметалічних систем;

- створення моделей, на основі яких запропоновано методика, яка дозволяє реалізувати метод неруйнівного контролю комплексного визначення ТФХ ортотропних і ТПК ізотропних матеріалів.

Методи досліджень. В основі методології досліджень лежать розроблені в дисертації підходи до формування математичних моделей та знаходження їх розв'язків. При виконанні роботи використовувались теорія узагальнених і спеціальних функцій, теорія інтегральних перетворень Лапласа, Фур'є, метод продовження функцій, методика розв'язування звичайних диференціальних рівнянь з коефіцієнтами типу імпульсних (одиничні асиметричні, дельта-функція Дірака та її похідні) функцій, а також загальні положення та методи математичного моделювання та обчислювальної математики.

Достовірність отриманих результатів забезпечується фізичним і математичним обґрунтуванням використовуваних моделей; перевірялась шляхом співставлення результатів з відомими точними і наближеними розв'язками; проведенням обчислювального експерименту з використанням різноманітних апроксимаційних засобів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- розроблено методи математичного моделювання процесів теплопровідності в однорідних термочутливих тілах з порожнинами (просторові стаціонарні задачі), нестаціонарних теплових процесів в однорідних термочутливих системах (одномірні нестаціонарні задачі) та досліджено квазістаціонарні теплові процеси в орто-

тропних термочутливих тілах при дії рухомих зосереджених теплових факторів та областей нагріву;

- з допомогою математичних моделей, заснованих на застосуванні апарату узагальнених функцій, одержано розв'язки статичних задач термопружності для кусково-однорідних термочутливих ізотропних та із сферичною анізотропією тіл;

- для ортотропних матеріалів (циліндрична і прямокутна анізотропія) запропоновано метод неруйнівного контролю визначення комплексу теплофізичних параметрів;

- для задач математичного моделювання з визначення комплексу ТПХ ізотропних матеріалів одержано аналітичні розв'язки прикладних задач квазістатичної термопружності, які є основою при розробці методів неруйнівного контролю визначення комплексу ТПХ ізотропних матеріалів;

- на основі запропонованих методик та їх програмної реалізації розроблено пакет прикладних програм, що забезпечує комплексне визначення ТПХ ізотропних та ортотропних матеріалів.

Практична цінність роботи. Практична значимість результатів полягає в тому, що вони дають можливість моделювати поведінку елементів конструкцій в умовах зовнішнього теплового впливу. Розроблені підходи розширюють область адекватності моделі, оскільки підвищені вимоги до точності знаходження теплового стану обумовлені тенденцією сучасного етапу розвитку техніки до зменшення запасу міцності елементів конструкцій, що в свою чергу приводить до зменшення ваги, габаритів, тобто -- до зниження матеріалоемності та вартості виготовлюваних виробів. Крім того, точність визначення температурного поля безпосередньо пов'язана з величиною не лише робочого напруженого стану, але й допустимого.

Реалізація результатів. На основі розроблених математичних моделей та підходів до визначення теплового і термопружного стану

кусково-однорідних і термочутливих тіл при заданому зовнішньому тепловому впливі створено алгоритми та відповідні програмні засоби для їх числової реалізації.

Створено програмні продукти для реалізації методу неруйнівного контролю комплексного визначення ТФХ ортотропних і ТПК ізотропних матеріалів. Алгоритм визначення ТПК ізотропних та ортотропних матеріалів реалізовано в вигляді пакету прикладних програм (ППП) "АРЕНА".

Проведено широкий обчислювальний експеримент по дослідженню теплових і термопружних процесів в кусково-однорідних і термочутливих середовищах. В розробленому програмному забезпеченні при наявності моніторів типу VGA, EGA передбачена можливість виводу обробленої в ході постпроцесування інформації на принтер або дисплей з використанням вбудованої графічної системи; в єдиному обчислювальному процесі є можливим побудова графіків, а також ізометричного зображення теплових і деформаційних полів в різних характеристичних перерізах.

Окремі програмні засоби передані для використання у Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут та АТ "Термоприлад" (Львів) для розробки і виготовлення елементів давачів температури та виконуючих пристроїв, створених на основі матеріалів з ефектом пам'яті форми.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідались на Регіональній конференції "Динамические задачи механики сплошной среды, теоретические и прикладные вопросы вибрационного просвечивания Земли" (Краснодар, 1992 р.), 1-му Міжнародному симпозиумі "Фізико-хімічна механіка композиційних матеріалів" (Івано-Франківськ, 1993 р.), 1-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків (Львів, 1993 р.), Першій Міжнародній Конференції "Конструкційні та функціональні

матеріали. Теорія, експеримент, взаємодія" (с.Славське, 1993 р.), Всеукраїнській науковій конференції "Розробка та застосування математичних методів в науково-технічних дослідженнях" (Львів, 1995), Четвертій Міжнародній нараді-семінарі "Інженерно-фізическіе проблеми нової техніки" (Москва, 1996 р), наукових конференціях професорсько-викладацького складу Дрогобицького пединституту ім. І.Франка (Дрогобич, 1993-1993 рр.).

В цілому робота доповідалась на семінарі кафедри прикладної математики Української академії друкарства (Львів, 1996 р.); семінарі кафедри математичного моделювання Львівського держуніверситету ім. І.Франка (Львів, 1996 р.); семінарі лабораторії нелінійних крайових задач відділу математичної фізики та теорії нелінійних коливань Інституту математики НАН України (Київ, 1996 р.).

На захист вносяться такі основні положення:

- підходи до побудови моделей опису стаціонарних, нестаціонарних та квазістаціонарних теплових процесів в анізотропних та ізотропних термочутливих системах;
- розроблені математичні моделі по визначенню термопружної поведінки ізотропних біметалічних систем, один з шарів якої виготовлено з матеріалу, що володіє ефектом пам'яті форми та анізотропних термочутливих сферичних систем з чужорідним вклученням;
- розроблені методи визначення комплексу TuX для термочутливих тіл з циліндричною ортотропією і нетермочутливих тіл з прямокутніною ортотропією, а також визначення TuX ізотропних тіл на моделі півобмежених та обмежених областей;
- алгоритми і програмні засоби реалізації запропонованих підходів неруйнівного контролю визначення теплофізичних параметрів ізотропних та анізотропних матеріалів.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 10 робіт.

Об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, заключення, додатку, списку літератури (203 найменувань). Загальний об'єм роботи - 198 стор., в тому числі 129 сторінок машинописного тексту, рисунків - 44, таблиць 4, додаток - на 8 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дано аналіз стану проблеми, що досліджується, та огляд існуючих підходів до побудови математичних моделей поведінки термопружних систем та одержання розв'язків крайових задач теплопровідності і термопружності, а також обернених задач теплообміну і термомеханіки по визначенню комплексу ТУХ і ТПХ ізотропних і анізотропних матеріалів. В розвиток вказаних наукових напрямків значний вклад внесли вітчизняні та зарубіжні вчені О.М.Аліфанов, В.В.Болотін, Я.М.Бурак, В.М.Вігак, А.С.Галіцин, О.Р.Гачкевич, Я.М.Григоренко, О.М.Жуковський, А.Д.Коваленко, В.П.Козлов, Ю.М.Коляно, В.І.Лавренко, М.П.Ленюк, В.О.Ломакін, С.Ф.Лушпенко, М.Д.Мартиненко, Ю.М.Мацевитий, А.В.Мултановський, Ю.М.Новічков, Я.С.Підстригач, Я.Г.Савула, В.С.Саркісян, М.М.Семерак, Ф.В.Семерак, А.Ф.Улітко, О.О.Углов, А.І.Уздальов, А.Г.Шашков, Д.Егер, Г.Карслоу, В.Новацький, Т.Снеддон та інші.

Визначено мету роботи, відображено актуальність розглядуваної проблеми. Коротко викладено зміст дисертації, сформульовано положення, які виносяться на захист.

В першому розділі роботи розроблено методи математичного моделювання просторового стаціонарного теплового стану в термотермочутливих тілах з порожнинами та дослідження нестаціонарних і квазістаціонарних теплових процесів в ізотропних

та ортотропних термочутливих середовищах.

Методика розв'язку просторових стаціонарних задач теплопровідності ілюструється на прикладі задачі теплопровідності для простору з кубічною порожниною в припущенні, що коефіцієнт теплопровідності залежить від температури. На поверхнях порожнини задані потоки тепла. З використанням змінної Кірхгофа

$$\theta = \frac{1}{\lambda_0} \int_{\lambda_0}^{\lambda} \lambda(\zeta) d\zeta$$

і методу продовження функцій розв'язування задачі зводиться до знаходження розв'язку трьохмірного диференціального рівняння з сингулярними коефіцієнтами в правій частині. Невідомі значення змінної Кірхгофа по квадратних поверхнях кубічної порожнини представлено подвійним рядом типу Фур'є

$$\theta|_{x=a+0} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} a_{nm} \cos \Lambda_n y \cos \Lambda_m z \quad (xyz),$$

де $\Lambda_j = \frac{j \cdot \pi}{a}$ ($j = n, m$); a - лінійний розмір порожнини; (xyz) -

означає циклічну перестановку просторових змінних. Для визначення невідомих коефіцієнтів розкладу одержана система лінійних алгебраїчних рівнянь. Проводиться співставлення побудованого розв'язку з розв'язком, отриманим на основі інтегральної характеристики температури по поверхні порожнини. Досліджено розподіл температури в залежності від просторової координати і критерія Кірпічова, який характеризує густину теплового потоку.

Далі розглядається нелінійна задача теплопровідності для кулі, по граничній поверхні якої здійснюється теплообмін із зовнішнім середовищем за законом Ньютона. Нестаціонарне рівняння теплопровідності лінеаризується з допомогою змінної Кірхгофа. Для лінеаризації граничної умови третього роду застосовується апроксимація шуканого значення температури по сферичній поверхні з ви-

користанням асиметричних одиничних функцій. Невідомі значення коефіцієнтів апроксимаційного представлення в припущенні лінійної залежності коефіцієнта теплопровідності від температури визначаються з рекурентних співвідношень. Проведено числові підрахунки розподілу температури в залежності від критерія Фур'є, безрозмірної радіальної координати при різних значеннях критерія Біо.

Наводиться розв'язок задачі теплопровідності для ортотропної пластинки виходячи з припущення, що теплофізичні характеристики матеріалу залежать від температури. Розглядувана півбезмежна ортотропна термочутлива пластинка нагрівається зосередженим джерелом тепла, яке рухається рівномірно і паралельно краю пластинки з постійною швидкістю. Між граничною поверхнею пластинки та оточуючим середовищем сталої температури здійснюється теплообмін по закону Ньютона. Шляхом введення змінної Кірхгофа та апроксимації значення температури в граничній умові нелінійна задача теплопровідності повністю лінеаризується. Як приклад прийнята лінійна залежність коефіцієнта теплопровідності від температури. Чисельно досліджено вплив ортотропії та інших факторів на поведінку температурного поля.

Теоретично встановлено закономірності розповсюдження тепла при дії по поверхні півбезмежного ортотропного тіла рухомої області нагріву прямокутної форми. При цьому враховано, що коефіцієнти теплопровідності λ_j ($j = 1, 2, 3$) вздовж головних осей, коефіцієнт об'ємної теплоємності c_v залежать від температури t розглядуваного тіла так, що відношення $a_j = \frac{\lambda_j(t)}{c_v(t)}$ (коефіцієнти температуропровідності вздовж головних напрямків) є сталими.

В другому розділі розглядаються задачі математичного моделювання термопружної поведінки кусково-однорідних термочутливих тіл в умовах дії зовнішнього теплового навантаження.

Спочатку приводиться постановка і розв'язок статичної задачі термопружності для біметалічної пластини, один із шарів якої - звичайний конструкційний матеріал, а другий виготовлено з матеріалу, що володіє властивістю ефекту пам'яті форми (ЕПФ). В даному випадку ця властивість моделюється термочутливістю температурного коефіцієнта лінійного розширення. Умови роботи розглядуваної біметалевої системи такі, що вона знаходиться в температурному діапазоні фазових перетворень. Проведено дослідження напруженого стану і зміщення в напрямку, перпендикулярному до площини спаяв біметалу, виготовленого з нікеліду титану (матеріал з ЕПФ) та сталі 60 Г (звичайний конструкційний матеріал).

Одержані числові дані свідчать, що при рівномірному і нерівномірному нагріві спостерігається екстремум залежності прогину по параметру κ_1 , який характеризує відношення товщин спряжених шарів. Для обох випадків точки максимуму майже співпадають і мають місце при $\kappa_1 = 0,6$.

Далі розглядається порожниста термочутлива куля з тонким інородним включенням, внутрішня і зовнішня поверхні якої підтримуються при заданих температурах. Представляючи вирази термопружних характеристик через одичні функції і здійснюючи граничний перехід приходимо до системи рівнянь термопружності, що визначає одомірну статичну задачу термопружності для тіл з сферичною анізотропією.

Виконано числовий аналіз поведінки температури, радіального переміщення, компонент тензора температурних напружень, рівня термонапруженого стану в системі, виготовленої на основі графітів. Рівень термонапруженого стану характеризується з допомогою безрозмірного напруження Губера-Мізеса

$$J_2^* = \frac{|\sigma_{rr}^* - \sigma_{\phi\phi}^*|}{\sqrt{3}}$$

де $\sigma_{\Gamma\Gamma}^*$, $\sigma_{\Phi\Phi}^*$ - безрозмірні температурні напруження. Інваріант J_2 пов'язаний з тою частиною повної енергії, яка дає вклад в формозміну при деформації.

Відзначимо, що методика одержання розв'язків задач теплопровідності і термопружності, яка базується на теорії композитів, що трактується як тіла з розривними параметрами при відповідному використанні апарату алгебри узагальнених функцій, дає змогу одержувати розв'язки різноманітних прикладних задач в замкнутому вигляді, єдиних у всій області їх визначення.

В третьому розділі розглядаються методи математичного моделювання теплопровідності і термопружності ізотропних і ортотропних (циліндрична і прямокутна анізотропія) тіл, на основі яких реалізуються методи неруйнівного контролю дослідження ТФХ і ТПХ матеріалів.

На моделі термочутливого шару з циліндричною анізотропією для різних типів зовнішнього теплового впливу одержані достатньо прості вирази, з допомогою яких визначено весь комплекс ТФХ.

Комплекс теплофізичних параметрів ортотропних матеріалів визначається на основі моделі півбезмежного тіла, яке піддається дії лінійних джерел тепла, певним чином розміщених по граничній поверхні.

Далі запропоновано методику, яка дозволяє визначати повний комплекс ТПХ ізотропних матеріалів методом неруйнівного контролю при одночасній реєстрації зміни температури і компонент тензора деформації граничної поверхні (модель півбезмежного тіла) і вертикальної компоненти вектора зміщення (модель шару кінцевої товщини) в залежності від часу. Так, зокрема, для ізотропного півбезмежного зразка при заданій на його граничній поверхні $z = 0$ теплової (потік тепла) та силових (нормальних і дотичних зусиль) факторів, розміщених симетрично на віддалі $2a$ одне від

ОДНОГО, МАЄМО

$$\omega = \frac{\theta_0(2\tau_1)}{\theta_0(\tau_1)} = \frac{-E_1(-\frac{1}{6Fo_1})}{-E_1(-\frac{1}{4Fo_1})} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{(1-\nu) \cdot \sigma_{zz}(\tau_1) + \nu \cdot \sigma_{xx}(\tau_1)}{(1-\nu) \cdot \sigma_{zz}(\tau_1) + \nu \cdot \sigma_{xx}(\tau_1)} \quad (2)$$

де τ_1 - момент часу, в який проводиться замір температури,

$Fo_1 = a\tau_1/d$; $-E_1(-\xi)$ - інтегральна показникова функція.

Вирази (1)-(2) є основою запропонованого методу неруйнівного контролю визначення ТПХ ізотропних матеріалів. Розвинута методика дає змогу визначати весь комплекс ТПХ (коефіцієнта теплопровідності λ , об'ємної теплоємності c_v , температуропровідності a , коефіцієнта Пуасона ν , термічного розширення α_t та модуля пружності ϵ) ізотропних матеріалів методом неруйнівного контролю без порушення цілісності зразка при одночасній реєстрації зміни надлишкової температури $\theta_0(\tau)$ і компонентів тензора деформації $\sigma_{xx}(\tau)$, $\sigma_{zz}(\tau)$ граничної поверхні в залежності від часу. Одержані при цьому залежності, які ґрунтуються на розв'язках відповідних двовимірних квазістатичних задач термопружності для розглядуваних областей, при заданому на їх граничних поверхнях комбінованому впливі (тепловому і силовому), використані далі при побудові пакету прикладних програм (ППП) "АРЕНА" визначення комплексу ТПХ ізотропних та ортотропних матеріалів.

Заключення містить короткі висновки по виконаній роботі.

В додатку міститься опис ППП "АРЕНА", який реалізує метод неруйнівного контролю комплексного визначення ТПХ ізотропних та

ортотропних матеріалів на моделі півбезмежних і обмежених тіл.

Основні результати роботи

1. Побудовано математичні моделі опису теплового стану термочутливих систем, на основі яких запропоновано методикку одержання аналітико-числових розв'язків просторових стаціонарних задач теплопровідності однорідних термочутливих тіл з порожнинами, одномірних нестационарних задач теплопровідності однорідних термочутливих структур та досліджено квазістаціонарні теплові процеси в ортотропних термочутливих тілах при дії рухомих зосереджених теплових факторів та областей нагріву.

2. Побудовані на основі розроблених математичних моделей аналітично-числові залежності температурних полів і температурних напружень в термочутливих однорідних та кусково-однорідних структурах дозволяють досліджувати термопружні процеси. Отримані розрахункові формули можуть використовуватися для матеріалів з незалежним від температури значенням коефіцієнта температуропровідності; в той же час коефіцієнти теплопровідності та об'ємної теплоємності можуть змінюватись в широких межах діапазону температур.

3. На основі запропонованих підходів до математичного моделювання теплових і термопружних процесів в термочутливих системах розроблено алгоритми та програмні продукти для побудови моделей та їх числового розв'язання.

4. На основі одержаних розв'язків прикладних задач статичної термопружності кусково-однорідних термочутливих сферичних і біматеріальних систем розроблено алгоритми та програмні засоби дослідження їх термопружної поведінки.

5. Створені на базі розроблених методів та алгоритмів програм-

ні засоби дають змогу здійснювати автоматизоване дослідження поведінки складних конструктивних елементів через розрахунок термомеханічних полів.

6. З використанням обчислювальних експериментів виконано комплекс досліджень температурних полів і напружень в термочутливих тілах, який показав наступне:

- врахування залежності теплофізичних характеристик від температури приводить до її зменшення в термочутливому середовищі в порівнянні з нетермочутливим тілом як у випадку стаціонарних, так і нестаціонарних та квазістаціонарних теплових процесів;

- для нелінійних задач теплопровідності термочутливих тіл лінеаризація граничної умови третього роду, яка проводиться шляхом простої заміни шуканого значення температури на змінну Кірхгофа, приводить до значного викривлення реальної картини поведінки температури в термочутливій кулі, навіть у випадку лінійної залежності коефіцієнта теплопровідності від температури при порівняно невеликому значенні температурного коефіцієнта;

- врахування ортотропії матеріалу у випадку дії в півобмежній пластинці рухомого джерела тепла приводить до незначного зменшення температури в порівнянні з ізотропним середовищем і складає порядку від 6 до 12 % . Відносний вплив ортотропії практично сталий як для термочутливих, так і для нетермочутливих матеріалів. В більшій мірі вплив на розподіл температури виявляє термочутливість матеріалу; числові підрахунки свідчать, що її врахування приводить до зменшення температури (майже в два рази) як для ізотропного, так і для ортотропного тіла;

- встановлено, що при русі гарячої плями прямокутної форми (ГПФ) по поверхні півобмежного ортотропного термочутливого тіла найбільший вплив на температуру та її градієнти спостерігається

ся в околі зони нагріву, при збільшенні швидкості руху ГППФ рівень температури в області нагріву та попереду її зменшується, хоча в області, позаду ГППФ на осі, що співпадає з віссю руху прямокутної зони, спостерігається деяка "аномалія" зазначеної вище закономірності; глибина розповсюдження температури є найвищою при дії нерухомої області нагріву і зменшується із збільшенням швидкості руху ГППФ;

- для термочутливої біметалічної системи, яка знаходиться в температурному діапазоні фазових перетворень та один із шарів якої виготовлено з матеріалу з ефектом пам'яті форми, встановлено, що при рівномірному і нерівномірному нагріві спостерігається екстремум залежності прогину по параметру, який характеризує співвідношення між товщинами спряжених шарів; в околі температури початку фазового перетворення величина скачка напружень змінюється немонотонно;

- наявність інеродного вилучення в термочутливій трансверсально-ізотропній сферичній системі виявляє суттєвий кількісний та якісний вплив на поведінку температурних напружень та рівень термопружного стану, який визначається другим інваріантом тензора напружень, пов'язаного з питомою потенціальною енергією формозміни.

7. Отримані результати по моделюванню кінетики квазістаціонарних теплових процесів в ортотропних термочутливих тілах можуть слугувати основою вибору режимних параметрів при вивченні теплового стану теплозахисних конструкційних елементів та обґрунтуванням врахування зміни коефіцієнтів теплопровідності від температури.

8. Розроблені методики, складені програми, розв'язки ряду задач прикладного характеру, а також результати числових досліджень, що представлено у вигляді графіків і таблиць, можуть бути ви-

користані в інженерній практиці при розрахунку елементів конструкцій, які знаходяться в умовах теплового впливу.

Основні результати дисертації опубліковані в таких роботах.

1. Коляно Д.М., Іваник Е.Г., Сікора О.В. Нелинейная задача теплопроводности для термочувствительного шара // Инж.-физ. ж. - 1992. - № 62, № 1. - С.126-129.
2. Коляно Д.М., Іваник Е.Г., Сікора О.В. Обернена коефіцієнтна задача термопружності ізотропного тіла // Доп. АН України. Сер. А. - 1992. - № 4. - С.41-44.
3. Коляно Д.М., Іваник Е.Г., Сікора О.В. Обернене коефіцієнтна задача термопружності ізотропного тіла на моделі шару // Доп. АН України. - 1992. - № 12. - С.43-47.
4. Коляно Д.М., Іваник Е.Г., Сікора О.В. Температурное поле в термочувствительном пространстве с кубической полостью при воздействии тепловых потоков // Мат. методы и физ.-мех. поля. - 1994. - Вып. 37. - С.94-100.
5. Асташкін В.І., Іваник Е.Г., Сікора О.В. Напружено-деформований стан термочутливої біметалічної системи // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 1996. - № 4. - С.33-43.
6. Іваник Е.Г., Сікора О.В. Термонапруженное состояние поллой сферы с тонким однородным включением // Динамические задачи механики сплошной среды, теоретические и прикладные вопросы vibrационного просвечивания Земли: Мат. докл. региональной конференции. - Краснодар, 1992. - С.68-70.
7. Асташкін В., Будз С., Землянський В., Іваник Е., Сікора О. Напружено-деформований стан композитних пластинчатих структур з особливими фізико-механічними властивостями // Фізико-хімічна механіка композиційних матеріалів; Анот. доп. 1-го Міжнародно-

- го симпозіуму ФХМКМ-93. - Івано-Франківськ, 1993. - С.16-17.
8. Асташкін В., Будз С., Землянський В., Іваник Б., Сікора О. Звичення термонапруженого стану елементів давачів температури, виготовлених з використанням матеріалу з ефектом пам'яті форми // I-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. Теми доп. - Львів, 1993. - С.85-86.
9. Сікора О.В. Визначення теплофізичних характеристик матеріалів з прямолінійною ортотропією // Конструкційні та функціональні матеріали. Теорія, експеримент, взаємодія: Теми доп. Першої міжнародної конференції. - Львів, 1993. - С.229-230.
10. Сікора О.В. Обернена коефіцієнтна задача теплопровідності для термочувливого шару з циліндричною ортотропією // Всеукраїнська наукова конференція "Розробка та застосування математичних методів в науково-технічних дослідженнях": Тези доп. - Ч. 2. - Львів, 1993. - С.93-94.

Особистий внесок. Всі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях, написаних у співавторстві, дисертантові належать: вивід основних рівнянь і співвідношень, проведення аналітичних перетворень, розробка алгоритмів і програм та проведення на їх основі чисельного експерименту. Постановка задач, розробка концепції проведення наукових досліджень, ідей, методів належить мому вчителю професору КОЛІНО Д.М., який так передчасно пішов з життя.

АННОТАЦІЯ. Сікора О.В. Математическое моделирование и исследование тепловых и термоупругих процессов в термочувствительных системах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.02 - математическое моделирование в научных исследованиях. Физико-механический институт им. Г.В.Карпенко НАН Украины, Львов, 1997.

Предложены математические модели описания стационарных, нестационарных и квазистационарных тепловых процессов в однородных и кусочно-однородных термочувствительных телах, статического термоупругого поведения термочувствительных кусочно-однородных систем, метода неразрушающего контроля определения комплекса теплофизических и термоупругих характеристик изотропных и анизотропных материалов. Разработаны программные комплексы по исследованию теплового и термонапряженного состояния конструктивных элементов в условиях внешнего теплового воздействия.

ABSTRACT. Sikora O.V. Mathematical modelling and investigations of heat and thermoelasticity processes in thermosensitive systems.

The thesis presented for a Degree of Candidate of Technical Sciences; speciality: 05.13.02 - mathematical modelling in scientific researches. Physico-mechanical Institute of the National Academy of Sciences, Ukraine, Lviv, 1997.

The mathematical models of description of heat conduction stationary, nonstationary and quasistationary processes for homogeneous and piecewise - homogeneous thermosensitive bodies also thermoelastic behaviour of thermosensitive piecewise-homogeneous is developed. Besides, the procedure of static thermoelasticity problems for thermosensitive piecewise-homogeneous bodies is also developed. In addition, the procedure for nondestroying control of thermo-physical and thermoelastic

characteristics complex determination for isotropic and anisotropic materials is carried out. The computer complex for investigation of thermal and thermostressed state of structure elements under external heat action conditions is constructed.

Ключові слова: математичне моделювання, температурне поле, температурні напруження, термочутлива система, анізотропія, обернена коефіцієнтна задача теплопровідності і термопружності.

СВУС

Нідп. до друку 16.51.57 Формат 80x84/16 Папір 490 Друк офсетний
мовн. друк. арк. Обл. вид. арк. Зам. № 24 Тираж 100

Віддруковано у виробничо-поліграфічному відділі Льв. ЦНТЕІ

AB 36.751