

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

Запорізький державний технічний університет

На правах рукопису

Килимник Ірина Михайлівна

**Об'єктно - орієнтоване моделювання термічного
напружено- деформівного стану системи "відливка -
металева ливарна форма"**

05.02.07 - "Механіка деформівного твердого тіла"

А в т о р е ф е р а т

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Запоріжжя - 1997



00752511 (L)

Запорізького державного технічного університету.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор

Абрамов Віктор Валеріанович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор

Бешенков С.М.

- кандидат технічних наук, доцент

Герасимов Ю.О.

Провідна організація - Запорізька державна інженерна академія

Захист відбудеться " 13 " червня 1997 р. о 13 год.
на засіданні спеціалізованої вченої ради К 08.02.03 у Запорізькому
державному технічному університеті за адресою: 330063,
м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Запорізького державного технічного університету.

Автореферат розіслано " 13 " травня 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради, д.т.н.

І.П.Волчок

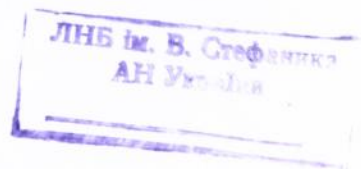
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Однією з головних задач у розвитку народного господарства України у галузі металургії і машинобудування є підвищення ефективності виробництва, удосконалення технологічних процесів, збільшення довговічності і надійності конструкцій діючого чи знов утворюваного устаткування, що дає максимальний ефект при мінімумі витрат за термін експлуатації. У великій мірі це відноситься до металевих ливарних форм.

Істотну роль у цьому відіграють розробка і впровадження нових засобів розрахунку і проектування раціональних конструкцій, що можуть привести до чималої економії матеріалів і одночасно підвищити надійність і довговічність металевих ливарних форм.

На сьогоднішній день порівняно повно досліджені питання хімічного складу матеріалів ливарних форм, технології отримання відливок, способів охолодження і т.п.. Багато уваги приділено впровадженню сучасних засобів машинного проектування на базі Систем Автоматизованого Проектування (САПР), включаючи вибір оптимальної конструкції ливарних форм. Проте, існують резерви як в удосконаленні конструкцій ливарних форм, так і в розробці нових більш ефективних методик та алгоритмів проектування і оптимізації.

Із цих позицій оптимальне проектування металевих ливарних форм вимагає розробки об'єктно-орієнтованих моделей термічного напружено-деформівного стану, що реалізують вимоги термозрівноваженості і рівномірності утворюваних конструкцій. Об'єктно-орієнтовані моделі вимагають також спеціальних методів розв'язання, які спрощують чисельну реалізацію, скорочують витрати машинного часу, знижують рівень вимог до апаратних засобів САПР і програмного забезпечення, а, отже, і витрати на проекту-



вання.

Ціль роботи. Підвищення якості зливоків, зниження матеріаломісткості і підвищення терміну служби, зниження витрат на проектування металевих ливарних форм, наприклад, виливниць, шляхом інженерної оптимізації конструкції, що задовольняє принципам термозрівноваженості і вимогам рівномірності, з використанням об'єктно-орієнтованих моделей теплового і температурного напружено-деформівного стану.

Завдання досліджень, спрямовані на реалізацію цілі роботи, сформульовані у вигляді :

- розробити математичну формуліровку теплопереноса при кристалізації зливоків у виливницях, що враховують вплив нелінійних механізмів теплообміну, нелінійність теплофізичних властивостей і конструктивних параметрів системи, що повинна бути об'єктно-орієнтована на підвищення точності моделювання температурного напружено-деформівного стану;

- уточнити математичну модель термонапруженого деформівного стану технологічної системи "зливков-виливниця" стосовно до експлуатаційних і технологічних умов на основі принципів рівномірності і термозрівноваженості;

- розробити нові підходи, засоби, алгоритми і програми для ЕОМ, що забезпечують високу точність і ефективність обчислювальної реалізації моделей термонапруженого деформівного стану системи "зливков-виливниця" при інженерній оптимізації її конструкції;

- із застосуванням засобів обчислювального експерименту розробити технічні рішення, пов'язані з підвищенням якості зливоків і створенням нових удосконалених конструкцій циліндричних виливниць із меншою матеріаломісткістю і більшим терміном служби.

Наукова новизна. На підставі аналізу багатьох робіт, присвяче-

них опису технологічної системи "зливко-виливниця", розроблена узагальнена математична формулювання механізмів теплопередачі під час робочого циклу, що відрізняється від відомих тим, що вона об'єктно-орієнтована на сполучення з відповідними моделями термічного напружено-деформівного стану і враховує залежність теплофізичних коефіцієнтів від температури, динаміку розвитку зони затвердіння, вплив нелінійних механізмів теплообміну як на зовнішніх границях, так і на границях сполучення компонентів технологічної системи.

Розроблена об'єктно-орієнтована математична модель термічного напружено-деформівного стану твердої фази зливку і термопружньопластичного деформування виливниць, що реалізує принципи рівномірності і термозрівноваженості, яка дозволяє із достатньою для оптимізаційного проектування точністю враховувати як вплив нестационарності температурних полів, так і конструктивні особливості хвилястої робочої поверхні ливарних форм.

Сполучення методу кусочно-східчастої апроксимації з конформними і неконформними координатними перетвореннями дозволило одержати нові наближені рішення систем нелінійних рівнянь теплопереносу, розробити ефективні і високоточні обчислювальні алгоритми і програми.

Сумісне використання методів багатовимірних скінченних елементів, нарощування і конформних відображень забезпечило розробку нових обчислювальних форм в структурі математичного процесору **Mathcad**, що дозволяють реалізувати моделі термічного пружньопластичного напружено-деформівного стану твердої фази круглих злиwkів і виливниць в чисельних і багатовимірних графічних, в тому числі і анімаційних формах.

Практична цінність результатів роботи. На підставі теоретичних досліджень, підтверджених експериментальними даними ви-

конані:

- розробки ефективних алгоритмів обчислювання і раціонального проектування технологічної системи "зливки-виливниця" на базі об'єктно-орієнтованих моделей, що враховують нелінійність механізмів теплопередачі і деформування;

- реалізація цих алгоритмів у вигляді програмних комплексів, отриманих за допомогою трансляторів алгоритмічних мов високого рівня і математичного процесору **Mathcad**;

- розробка нової конструкції циліндричної виливниці, яка забезпечує підвищення якості злиwkів, зниження маси і збільшення довговічності виливниць, захищено а.с. СРСР №1680437 і патентом України № 7860 "Виливниця для розливки сталі", що застосовується для отримання злиwkів на Нижньодніпровському трубопрокатному заводі (витрати чавуну на одну виливницю зменшені на 300 кг, довговічність підвищена на 11%) і може бути впроваджена на інших металургійних підприємствах.

На захист виносяться :

1. Спряжені об'єктно-орієнтовані математичні моделі теплового і температурного напружено-деформівного стану технологічної системи "зливки-виливниця", що враховують нелінійність теплофізичних властивостей, нелінійність умов теплообміну на зовнішніх і внутрішніх граничних поверхнях; нелінійність теплових джерел, зумовлених фазовими переходами в зоні кристалізації, динаміку кристалізації кірки злиwку, механізми пружного, пластичного деформування, деформування повзучістю і реалізують принципи термозрівноваження.

2. Ефективні підходи до обчислювальної реалізації об'єктно-орієнтованих моделей, які базуються на сумісному застосуванні методів: багатовимірних скінченних елементів, кусочно-східчастої апроксимації, нарощування, лінеаризації, конформних і неконформ-

них перетворень, які дозволяють урахувати конструктивні особливості систем, що досліджені.

3. Алгоритми, програми і обчислювальні структури математичного процесора **MathCad**, що використовують ці підходи і забезпечують дослідження і раціональне оптимізує проектування технологічних систем типу "зливки-вливноїця".

4. Результати досліджень методами обчислювального експерименту теплового і термічного пружньодеформівного стану у різних фазах робочого циклу.

5. Розробку із використанням обчислювальних структур математичного процесора **MathCad** нових конструктивних рішень, що забезпечують зменшення тріщиноутворення колісних злиwkів, зниження матеріаломісткості і підвищення довговічності вливниць, впроваджених у виробництво.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи обговорювались на Республіканській науково-технічній конференції "Ефективні обчислювальні методи розв'язання крайових задач механіки твердого деформівного тіла" (м. Харків, 1989 р.); Республіканській науково-технічній конференції " Механіка і нові технології " (м. Севастополь, 5-10 вересня 1995р.); звітвих наукових конференціях Запорізького державного технічного університету (м. Запоріжжя, 1989-1996 рр.); наукових семінарах кафедр "Опір матеріалів" і " Вища математика" Запорізького державного технічного університету (м. Запоріжжя, 1989 -1996 рр.); Міжкафедральному тематичному семінарі "Механіка деформівного твердого тіла" Запорізького державного технічного університету (1996 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 робіт, одержано два авторських свідоцтва і патент України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів і загальних висновків, викладених на 149 стор.,

друкованого тексту, містить 27 малюнків, 1 таблицю і додатки. Список використаної літератури включає 150 найменувань.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обгрунтована актуальність проблеми, що вирішується, сформульовані ціль і задачі досліджень, наукова новизна і практична цінність роботи, апробація її результатів.

У першій главі подається аналіз проблеми зниження матеріаломісткості і збільшення довговічності виливниць; сучасних експериментальних і математичних методів дослідження систем "відливка-металева ливарна форма", в тому числі - технологічних систем "зливков-виливниця"; сучасних засобів проектування ливарних форм.

Показано, що оптимальні конструкції виливниць повинні задовольняти великій кількості вимог як по якості зливу, так і по довговічності, що визначаються цілим рядом факторів, таких як: властивості чавуну; технологія і обладнання, що застосовуються при виготовленні виливниць; особливості конструкції; умов експлуатації. При цьому визначено, що особливості конструкції круглих виливниць обумовлюють меншу витривалість і більшу схильність до тріщиноутворень і, отже, більшу витрату виливниць на тонну відливки.

Аналіз попередніх робіт дозволив зробити висновок, що врахувати всі ці фактори в повному обсязі складно. Задовольняючи вимогам точності, ефективності реалізації і адекватності реальним технологічним процесам результати можуть бути отримані в рамках спеціального підходу, запропонованого Абрамовим В.В. Згідно йому, довговічність металевих ливарних форм, зокрема виливниць, визначається двома критеріями термостійкості : першим - темпера-

турним порогом різкого зниження малоциклової стомленої міцності чавуна; другим - допусковим максимальним перепадом температур по товщині стінки.

Досвід проектування і експлуатації виливниць показав, що більше відповідають вимогам по якості зливу, матеріаломісткості і довговічності термозрівноважені конструкції, які задовольняють обмеженням: максимальні середня температура і перепад температур у стінці виливниці повинні бути постійними по її висоті і наближатися до відповідних значень першого і другого критеріїв термостійкості.

Обґрунтовано, що витрати на конструкторську підготовку виробництва нових металевих ливарних форм можуть бути знижені за рахунок зменшення обсягу експериментальних досліджень на спеціальних натурних моделях або дослідно-промислових зразках і розширення досліджень методами математичного моделювання.

Докладний аналіз різних аналітичних і наближених методів розв'язання, в тому числі і дискретних (скінченних різниць, скінченних і граничних елементів) показав певні переваги методу багатовимірної скінченної елементи Абрамова В. В., у відповідності з яким система "циліндричний зливко-виливниця" розчленовується на скінченні елементи, що утворюються або поздовжніми, або поперечними перерізами за допомогою площин, які, відповідно, проходять через вісь симетрії чи перпендикулярно до неї. Спряження окремих елементів один із одним виконується на основі умов сумісності зміщень у точках колокації на граничних поверхнях чи контурах. Перевага такого підходу полягає в тому, що він забезпечує істотне зниження витрат часу і ресурсів при обчислювальній реалізації за рахунок зниження вимірності математичного формулювання для кожного скінченного елементу і дозволяє обмежити число складових деформацій і напружень радіальними, окружними і

осьовими. При цьому попередня практика використання цього методу підтверджує його високу точність, що відповідає умовам дослідження.

Друга глава присвячена розробці фізико-математичної моделі теплопередачі в різних фазах робочого циклу технологічної системи "зливко-виливниця", що об'єктно-орієнтована на спряження з моделями її термічного напружено-деформівного стану.

Для того, щоб математична модель теплопередачі задовольняла вимогам достовірності і адекватності, вона включає відповідні описи різноманітних механізмів нестационарного теплопереносу: конвективного - в режимі природньої конвекції у расплаві та фільтраційної конвекції в зоні кристалізації; нелінійної теплопровідності, що має місце в усіх складових системи. Таким чином, вона являє собою систему нелінійних нестационарних рівнянь переносу в частинних похідних, з локальними складовими швидкості зміни вмісту тепла в зонах розплава, кристалізації, кірці зливку і ливарній формі, конвективними складовими - в зонах розплава і кристалізації, та джерелами, що виділяються при кристалізації за рахунок теплоти фазових переходів.

Відповідні геометричні області мають спільні граничні поверхні, причому ізотермічні поверхні "ліквідус" - "солідус" є "вільними", що визначаються при розв'язанні рівнянь.

Однозначність цієї моделі зумовлена відповідними описами краєвих умов, що включають умови Коші, які визначають початковий тепловий стан системи; граничні умови, які моделюють конвективно-радіаційний теплообмін з навколишнім середовищем на зовнішніх поверхнях; нерозривність струмів тепла і розривність поля температур, яка зумовлена відсутністю ідеального теплового контакту на границях виливниці з кіркою зливку і піддоном; умови Стефана при наявності евтектичних фазових перетворень на ізотермічній

поверхні з температурою "солідуса".

Так як виникнення і розвиток зазору між зливком і виливницею, що суттєво впливає на тепловий стан системи, зумовлено змінами термічного напружено-деформівного стану кірки зливку, то виникає необхідність сполучення математичних моделей теплопередачі і деформування на додаткових умовах сумісності зміщень, що істотно ускладнює проблему порівняно з інваріантними підходами до моделювання.

Згідно із принципами об'єктно-орієнтованого моделювання обґрунтована можливість конкретизувати математичну модель теплопередачі для початкових фаз робочого циклу, які відповідають обмеженням по термозрівноваженості конструкції і критеріям термостійкості.

Третя глава присвячена дослідженню напружено-деформівного стану кірки зливку в першій фазі робочого циклу з метою визначення умов, що виключають утворення гарячих тріщин на її поверхні. Об'єктно-орієнтована модель теплопередачі при кристалізації кірки зливку наближено враховує конвективну складову за допомогою ефективного коефіцієнту теплопровідності. Вимоги підвищеної точності при моделюванні термічного напружено-деформівного стану кірки зливку зумовили необхідність явного виділення вільної границі "солідуса", що реалізовано методом кусочно-східчастої апроксимації.

Для цього виділялися вільні ізотермічні поверхні (1), між якими виконувалася квазістаціонарна апроксимація (2) з дотриманням умов нерозривності полів температур і концентрацій твердої фази в рідкій. Після інтегрування нелінійних рівнянь переносу тепла по об'ємам, які обмежені вільними ізотермічними поверхнями, об'єктно-орієнтована модель замикалась умовами (3), що становлять інтегральний аналог відомих умов Стефана.

$$(S(x, y, z, \tau)_{\text{пов}})_i = t(x, y, z, \tau) - \left[t_p + (t_{\text{пов}} - t_p) \cdot \frac{i-1}{n} \right] = 0, \quad (1)$$

$$\text{div}(\lambda_{\text{эф}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(t^{<i>})) = 0, \quad (2)$$

$$\sum_{j=i}^n \left[L_j \cdot (\rho_1)_j \cdot \overline{\psi_j} \dots + (c_2)_j \cdot (\rho_2)_j \cdot [T_L - (t_2)_j] \right] \cdot \frac{d}{d\tau} v_j = \int_{S_{\text{пов}_i}} [\lambda_2 \cdot \overrightarrow{\text{grad}}[t(2)]] dS' \quad (3)$$

$$i=(1, 2..n-1)$$

Вибір квазістаціонарної апроксимації (2) забезпечує можливість використання методу конформних відображень для врахування впливу реальної форми робочої поверхні виливниці на температурні поля кірки колісного зливку. Результати обчислювання цих температурних полів представлені на Рис. 1а для кінця першої фази $t=5$ хв., що відповідає моменту відрива кірки від робочої поверхні виливниці. Великі градієнти температур в кірці зливку за умови нерозривності струмів тепла обумовлюють відповідні їм градієнти температур в стінці виливниці.

Для моделі напружено-деформівного стану кірки зливку в першій фазі робочого циклу характерні механізми пружного, пластичного деформування і деформування повзучості, що пов'язане, передусім, з високими локальними температурами. Високі локальні швидкості під'єма температури, нарощення твердої фази з температурною границею "солідуса", вимагають виділення локальної і конвективної складових, які можна умовно розглядати як динамічну і статичну за характером зміни термічного стану кірки зливку. Можливість суперпозиції складових деформування визначена для повних диференціалів деформацій (4) і, як звичайно, приймається для задач подібного типу.

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon_r \\ d\varepsilon_\theta \\ d\varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} d(\varepsilon_r^e) + d(\varepsilon_r^p) + d(\varepsilon_r^c) \\ d(\varepsilon_\theta^e) + d(\varepsilon_\theta^p) + d(\varepsilon_\theta^c) \\ d(\varepsilon_z^e) + d(\varepsilon_z^p) + d(\varepsilon_z^c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{r(\tau)} \cdot d\tau + \left(\overrightarrow{dr}, \overrightarrow{\text{grad}(\varepsilon_r)} \right) \\ \varepsilon_{\theta(\tau)} \cdot d\tau + \left(\overrightarrow{dr}, \overrightarrow{\text{grad}(\varepsilon_\theta)} \right) \\ \varepsilon_{z(\tau)} \cdot d\tau + \left(\overrightarrow{dr}, \overrightarrow{\text{grad}(\varepsilon_z)} \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_r^{e,p} \\ \varepsilon_\theta^{e,p} \\ \varepsilon_z^{e,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_r^{\omega(\tau)} \left(\varepsilon_r^{e,p} \right)_\omega d\omega + \left(\varepsilon_r^{e,p} \right)_{\text{стат}} \\ \int_r^{\omega(\tau)} \left(\varepsilon_\theta^{e,p} \right)_\omega d\omega + \left(\varepsilon_\theta^{e,p} \right)_{\text{стат}} \\ \int_r^{\omega(\tau)} \left(\varepsilon_z^{e,p} \right)_\omega d\omega + \left(\varepsilon_z^{e,p} \right)_{\text{стат}} \end{bmatrix}, \quad \omega(\tau^x) = r \quad (5)$$

Згідно із методом нарощування кірки (5) динамічна складова визначається шляхом приєднання до напруженого об'єму кірки зливку ненапруженого, нарощеного, обумовленого швидкістю розв'язку внутрішньої поверхні кірки. Для знаходження складових напружень і деформацій, інтегрування по часу рівнянь рівноваги та нерозривності виконується з моменту часу τ^* , коли вільна границя "солідуса" мінає точку з радіусом r .

Перевірка достовірності результатів моделювання робиться шляхом порівняння з розрахунками термічного напружено-деформованого стану, що виконані Єфімовим В.О., Абрамовим В.В., Кургановим В.О. для гладкої і шестигранної робочої поверхні за методами скінченних різниць та елементів. Відносний відхил результатів склав 4.5-7% по локальним температурам, і 9-12% по інтенсивностям напружень і деформацій.

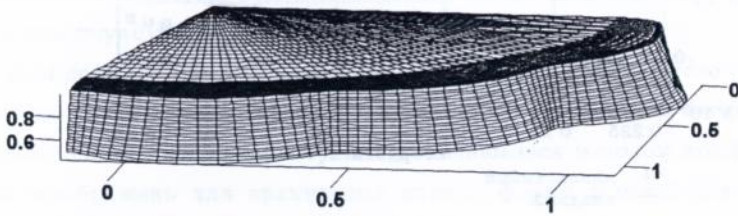
На час відриву кірки зливку радіальні і окружні складові напружень, обумовлені динамікою її зростання, досягають 14% від

відповідних статичних та протилежні їм по знаку, а сумарна радіальна складова не перевищує 15% від окружної (Рис. 16). Тому для початкового наближення достатні моделі статичного деформування. Треба також відмітити збільшення пружної складової в інтенсивності деформації хвилястої кірки у порівнянні з гладкою і суттєве зниження інтенсивності напружень на її зовнішній поверхні. Це забезпечено раціональним профілюванням робочої поверхні виливниці для колісних злиwkів з параметром хвилястості (відношення висоти хвилі до її радіусу) - 0.6 (при фіксації інших конструктивних параметрів). Реалізація цього технічного рішення дозволяє знизити можливість утворення гарячих тріщин і, відповідно, сприяє підвищенню якості злиwку.

Четверта глава присвячена дослідженню впливу конструктивних параметрів виливниці на її температурний і термічний напружено-деформівний стан в третій фазі робочого циклу до моменту здобуття злиwку, що відповідає обмеженням по першому критерію термостійкості.

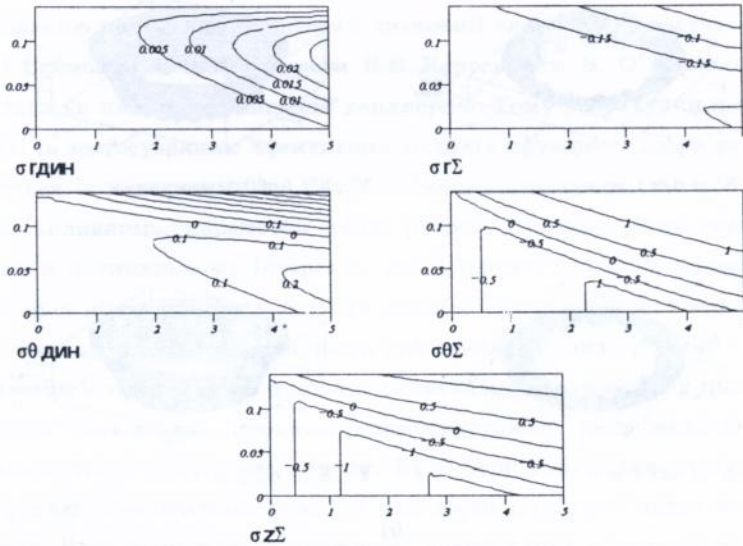
Показано, що, згідно з принципами об'єктно-орієнтованого моделювання, можна застосувати метод перетворення температурної моделі системи "зливok-виливниця" до лінійної форми в трансформаціях Ейерса і градаціях Шлака-Сарьянта як для поперечного, так і поздовжнього перерізів. При цьому, для використання явної схеми скінченних різниць при хвилястій формі робочої поверхні, виконані координатні перетворення типу Ландау, що значно спростило алгоритм обчислювальної реалізації та підвищило її ефективність.

Висока точність і достовірність результатів, отриманих за допомогою цієї об'єктно-орієнтованої моделі, підтверджена відповідним порівнянням з експериментальними даними по обмірам промислових зразків виливниць колісних злиwків на протязі робочого цик-



$Xg3, Yg3, Tg3$

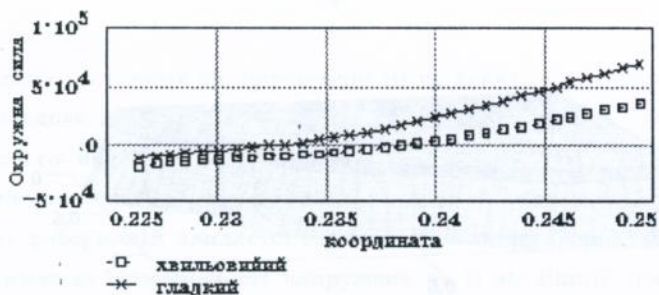
а) $\tau = 5$ мин



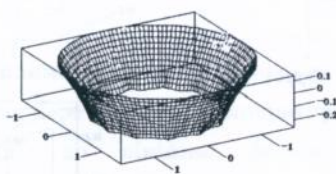
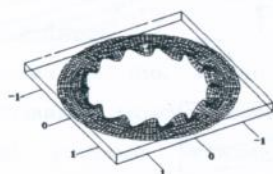
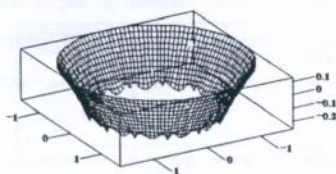
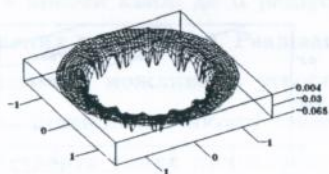
б)

а) - температурне поле під час утворення зазору з виливницею у в.о.; б) - напружений стан кірки зливку ($\sigma_{rдин}, \sigma_{\thetaдин}$) - радіальні і окружні динамічні складові напружень; ($\sigma_r\Sigma, \sigma_{\theta\Sigma}, \sigma_z\Sigma$)-сумарні радіальні, окружні і осьові складові напружень, МПа.

Рисунок 1 . Температурний і напружений стан кірки зливку в першій фазі робочого циклу .



а)



б)

а) - розподіл окружних зусиль у поздовжніх елементах кірки для гладкої (більші) і хвилястої (менші) робочої поверхні; б) - розподіл радіальних (σ_{rr}), окружних ($\sigma_{\theta\theta}$), дотичних ($\sigma_{r\theta}$), осьових (σ_{ζ}) складових напружень у виливниці на рівні "гарячої плями".

Рисунок 2. Напружений стан системи "зливков-вливниця" під час здобуття зливку.

лу. Відносний відхил результатів не перевищив 6.5%, що повністю задовольняє вимогам при проектуванні нових і оптимізації існуючих конструкцій виливниць.

Для дослідження температурного напружено-деформівного стану системи "зливоч-виливниця" також застосовувався метод багатовимірної скінченної елементу. Він доповнювався методом конформних відображень для врахування впливу форми робочої поверхні виливниці. Пластична складова деформації враховувалася за методом послідовних наближень.

Отримані результати порівнювалися для виливниць з хвилястою і гладкою поверхнями. Базовий дисковий елемент, що застосовувався Єфімовим В.О., Абрамовим В.В., Кургановим В. О., можна розглядати як частинний випадок хвилястого. Тому розрахунки, що виконані із застосуванням ефективних модулів пружності, добре узгоджуються із наведеними на Рис.2 а. Вони засвідчують, що конструкції виливниць, параметри хвилі робочої поверхні яких знаходяться в оптимальному інтервалі, що дорівнює (0.5-0.7), дозволяють більш ніж в два рази знизити сумарні окружні сили в кінці і, отже, значно зменшити імовірність утворення гарячих тріщин.

Для оцінки точності методики застосовувались розроблені у цьому розділі тест-моделі пружного температурного напружено-деформівного стану хвилястого кільця. Було отримано точне розв'язання у класі аналітичних функцій для першої і другої задач напруження. Ефективні модулі пружності визначалися з умов рівності дислокацій на хвилястому і круговому контурах. При порівнянні наближеного рішення із точним відносний відхил не перевищив 8 %, що повністю задовольняє вимогам при оптимізації контурів робочої поверхні у поздовжніх і поперечних перерізах.

На Рис. 2 б подані результати обчислювання пружно-пластичного напруженого стану стінки виливниці в зоні гарячої плями.

Хвиляста форма робочої поверхні виливниці виявляє істотний вплив на зміну радіальних, окружних і осьових складових напружень тільки в області, що прилягає до робочої поверхні. Дотичні напруження відносно малі і не перевищують 5% від окружних і осьових складових. Інтенсивності напружень на зовнішній поверхні мало змінюються у порівнянні з виливницею, що має гладку, або неоптимізовану хвилясту робочу поверхню.

Особливості об'єктно-орієнтованого моделювання: простота і ефективність обчислювальної реалізації дозволили побудувати інженерну методіку проектування оптимізованих циліндричних виливниць. За регресійною формулою, що отримана спільно із Абрамовим В.В, визначається початкове наближення оптимальної товщини стінки виливниці. Виконуються температурні розрахунки цього наближення системи "зливков-виливниця", після цього уточнюють час здобуття зливку і оптимальну товщину стінки в зоні гарячої плями. Потім виливниця профілюється у поздовжньому перерізі у відношенні товщин стінок в перетинах з нижнім і верхнім торцями, що дорівнює 0.85-0.9. Ця методика дозволила розробити і завпровадити нову, захищену патентом України виливницю для виробництва колісних зливків, що має вищу на 11 % довговічність і нижчу на 300 кг масу.

Загальні висновки і результати роботи

1. Внаслідок аналізу особливостей температурного напружено-деформівного стану твердої кірки зливку запропонована нелінійна математична модель, що враховує пружньопластичні деформації, явища повзучості; фазові перетворення і "вільне" нарощування кірки по границі "солідуса".

2. Показана можливість ефективної чисельної реалізації моделі термонапруженого деформівного стану системи у процесі нарощування кірки зливку засобом багатовимірних скінченних елементів

при застосуванні емпіричних чи теоретичних залежностей модуля пружності від параметру хвилястості.

3. Розроблена модифікована спряжена математична модель теплопередачі в системі "зливков-випливиця" в трансформаціях Бйєрса і градаціях Шлака-Сар'янта, що враховує нелінійність теплофізичних властивостей; тепловиділення фазових переходів; нелінійність теплообміну на геометрично нелінійних граничних поверхнях; утворення і розвиток зазору і дозволяє використовувати у відповідних рівняннях переносу лінійні диференціальні оператори.

4. Отримана обчислювальна реалізація моделі температурного стану за допомогою сполучення методів багатовимірних скінченних елементів; кусочно-східчастої апроксимації, в наближенні до узагальненої проблеми Стефана; конформних відображень; нормованих координатних перетворень з явною скінченно-різничною апроксимацією, яка дозволила значно скоротити витрати машинного часу при розрахунках в різних фазах робочого циклу.

5. Показана можливість значного скорочення обсягу і витрат на експериментальні дослідження при визначенні термо-напруженого стану випливиць за рахунок використання об'єктно-орієнтованих моделей.

6. Запропонована інженерна методика проектування і розроблена оптимізована термозрівноважена випливиця для колісних зливків, яка має змінну в пропорції 0.85-0.9 товщину стінки і параметр хвилі робочої поверхні 0.6, що дозволило досягти кращої на 11 % довговічності при меншій на 300 кг масі.

Основний зміст дисертації опубліковано у наступних роботах

1.Особенности деформации корки затвердевающего волнистого сликта./В.В.Абрамов, В.А.Ефимов,Р.Я.Якобше,О.М.Степанов,И.М.Ки-

лимник // Проблемы литья, -1991.-№ 4, -С. 13-17.

2. Килимник И.М.Применение метода дихотомии к упруго-пластическому расчету дисков переменной толщины при использовании деформационной теории пластичности.//Повышение надежности и долговечности деталей машин и конструкций: Сб. науч. тр. - Запорожье, 1988. - С. 67-70.

3. Расчет методом многомерных конечных элементов напряженного состояния в системе "слиток-изложница"./В.В. Абрамов,И.М. Килимник и др.//Повышение надежности и долговечности деталей машин и конструкций. Сб.науч.трудов.-Запорожье,-1988.-С. 53-57.

4. Абрамов В.В.,Гулин С.А.,Килимник И.М.Анализ напряженного состояния термоуравновешенной цилиндрической изложницы. // Новые конструкционные материалы эффективные методы их получения и обработки, повышение надежности и долговечности деталей машин и конструкций.Сб.науч.трудов. Киев: УМК ВО, -1991, -С. 112-114.

5. Патент України № 7860 від 26.12.95.Виливниця для розливки сталі.МКИ В22D7/06./В.В.Абрамов,І.Г.Борисенко,В.К.Гулий,В.Ї.Клименко,М.Д.Мартиненко, А.І.Поюровский, І.М.Килимник. - № 1680437 А1 (Україна), Бюл. № 4.

6. А.с.№ 1680437 СССР.Изложница для разливки стали. /Абрамов В.В.,Борисенко И.Г., Гулый В.К.,Поюровский А.И.,Килимник И. М. Оpubл. в Б.И. 1991, № 36.

7. А.с.№ 1665219 СССР,Способ определения температурных напряжений в призматических телах./Абрамов В.В., Андриенко А.Г., Кузнецова М.И.,Кичаев С.В.,Крипак В.В.,Швец П. П., Килимник И.М., Родякин С.В. Оpubл. в Б.И. 1991, № 27.

8. Уточненная методика определения оптимальной толщины стенок изложницы./ Абрамов В.В.,Килимник И.М. и др.// -Запорожье, 1989, - Деп. в УкрНИИНТИ № 704-Ук - 89. 9 с.

9. Сравнение одношагового и многошагового численных методов расчета дисков произвольного профиля./В.В.Абрамов,А.А.Будник, С.В. Кузнецов,И.М. Килимник //- Запорожье, 1989, - Деп. в УкрНИИНТИ, - №1618-Ук- 89. 10 с.
10. Абрамов В.В.,Гулин С.А.,Килимник И.М. Проектировочный упругий расчет дисков сложного поперечного сечения. - Запорожье, 1990, Деп.в УкрНИИНТИ,-№1172-Ук-90. 15 с.
- 11.Термоуравновешенная конструкция изложницы для колесных слитков./В.В.Абрамов,И.Г.Борисенко,.М.Килимник и др. // - Запорожье, 1992, Деп. в УкрНИИНТИ №412 -Ук-92. 6 с.
12. Об одном подходе численного моделирования нелинейных процессов теплопереноса в областях сложной геометрической конфигурации./В.В.Абрамов,С.Т.Ярымбаш,И.М.Килимник,А.Н.Харченко//Запорожье,1994, Деп.в ГНТБ Украины №861Ук-94. 19 с.
- 13.Напряженно-деформированное состояние системы "Отливка-литейная форма". /В.В.Абрамов,А.А.Будник,И.Г.Борисенко,С.В. Кузнецов, В.И.Ивахнин, И.М.Килимник, Г.В.Романиченко //Запорожье,1996,Деп. в ГНТБ Украины №343-УК-96. 8 с.
14. Абрамов В.В.,Швец П.П.,Килимник И.М. Численный метод проектирования термоуравновешенных металлургических литейных форм //Тез.докл.конф. по эффективным численным методам решения краевых задач механики твердого деформируемого тела . - Харьков, -1989. -С. 3-4.
15. Асатуриян А.Ш.,Ярымбаш С.Т.,Килимник И.М.Об N-фазной задаче Стефана применительно к процессам обезвоживания целлюлозных изоляционных материалов.//Тез.докл.ІІ респ. конф. "Выч. матем. в совр.науч.-техн.прогрессе ". Киев, -1978. - С. 87.
- 16.Оценка предельных нагрузок в машиностроительных конструкциях с плоскими трещинами в форме некругового кольца / В.И. Бешенкова,И.М.Килимник,И.А. Левицкий,С.Ф. Шишканова//Тез.

докл. науч.-тех. конф. "Механика и новые технологии" . - Севастополь, - 1995. -С. 13-17.

17. Розробка та застосування методу малого параметра до розв'язання інтегродиференціального рівняння при дослідженні напруженого стану крихкого тіла з двозв'язною плоскою тріщиною /В.Бешенкова, І.Килимник, І.Левицький, С.Шишканова //Тези доп. Всеукраїнської наукової конференції "Розробка та застосування математичних методів в науково-технічних дослідженнях". -Львів, - 1995. -С. 69.

В усіх роботах автору дисертації безпосередньо належать математичні моделі, розробка методів, методик і алгоритмів розв'язання задач, результати досліджень методами обчислювального експерименту, а також співучасть у розробці нових технічних рішень та винаходів.

Summary

Kilimnik I.M. Objectively oriented modelling of thermal stress-deformation condition of a system " Casting - metal mould".

The dissertation on a scientific degree of the candidate of technical sciences on a speciality 05.02.07 - mechanics of a deformed solid body, State technical university, Zaporozhye, 1997.

Objectively oriented modelling of thermal stress-deformation condition of a technological system "The ingot - iron mould" and new methods of nonlinear problems decision for heat transfer and deformation for optimizing numerical experiment are received. Technical decisions aimed of durability increase and iron mould weight decrease of wheel ingots are presented.

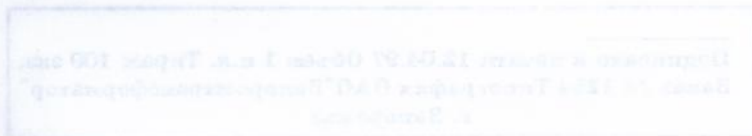
Аннотация

Килимник И.М. Объектно-ориентированное моделирование термического напряженно-деформированного состояния системы "Отливка-металлическая литейная форма"

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 - механика деформируемого твердого тела, Запорожский государственный технический университет, Запорожье, 1997.

Получены объектно-ориентированные модели термического напряженного и деформированного состояния технологической системы "слиток-изложница", новые методы решения нелинейных задач теплопереноса и деформирования для оптимизирующего численного эксперимента. Приводятся технические решения для повышения долговечности и снижения массы изложниц для колесных слитков.

Ключові слова: зливки, виливниця, теплопередача, напружено-деформований стан, об'єктно-орієнтоване моделювання, обчислювальний експеримент, конформні перетворювання, баговимірний скінченний елемент, нарощування, кусочно-східчаста апроксимація, хвиляста робоча поверхня, оптимізація, довговічність.

436486

Подписано к печати 12.04.97 Объем 1 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1254 Типография ОАО "Запорожтрансформатор"
г. Запорожье