Міністерство освіти України

Дніпродзержинський державний технічний університет

На правах рукопису

ГРІДІН Сергій Васильович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ТВЕРДНЕННЯ ВІДЛИВКІВ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Спеціальність 05.16.02 - Металургія чорних металів

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Дніпродзержинськ - 1996

є рукопис

в Донецькому

державному університеті

Науковий керівник:

кандидат технічних наук БОРОДІН В.С.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор НЕДОПЬОКІН Ф.В.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор ПОСТОЛЬНИК Ю.С.

кандидат технічних наук, доцент ЖУК В.І.

Провідна організація:

Донецький державний технічний університет

Захист відбудеться "23" квітня 1996 р. о 12 год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 37.01.01 Дніпродзержинського державного технічного університету за адресою: 322618, м. Дніпродзержинськ, вул. Дніпробудівська, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці ДДТУ.

Автореферат розісланий "19" березня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор ЧЕРНОВ М.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Відомо, що на відміну від більшості ливарних сплавів чавун має теплофізичні характеристики, дуже залежні від характеру структури, параметри якої у першу чергу залежат від локальних умов кристалізації. Тому внаслідок постійно зростаючих вимог до якості та властивостей литої металопродукції виникає необхідність всебічного дослідження теплофізичних процесів під час кристалізації та твердження чавунних відливків.

Для проведення таких досліджень широко застосовується обчислювальний експеримент, дозволяючий виконати комплексне дослідження процесу твердження відливків та визначити оптимальні умови їх формування, забезпечуючі одержання якісного лиття. У зв'язку з цім, актуальним завданням є розробка математичних моделей теплофізичних процесів під час твердження розплаву чавуну і методів проведення комплексного чисельного дослідження ціх процесів.

Мета дисертаційної роботи. Розробка питань математичного моделювання теплофізичних процесів під час твердження відливків з високоміцного чавуну. В завдання дослідження входило:

1. Відпрацьовування методики чисельного дослідження названих процесів (компьютерний експеримент).

2. Розробка програмних засобів для комплексного чисельного дослідження процесів під час твердження чавунних відливків, з подальшою розробкой гібридної експертної системи технологічної підготовки ливарного виробництва.

3. Чисельне дослідження впливу: теплових умов твердження відливка, кінетики формування неметалічних включень (НВ), термонапруженого стану відливка, а також умов модифікування розплаву чавуну в ковші порошковим дротом під час одержання високоміцного чавуну на процес формування відливка.

Наукова новизна роботи Сформульована математична модель теплопереносу у двофазній зоні (ДФЗ) відливка під час твердження з урахуванням просторової неоднорідності у розподілі твердої фази та різниці теплоємностей твердої і рідкої фаз, а також виділення захованої теплоти кристалізації структурних складових чавуну при фазових переходах у розплаві, у тривимірної постановці.

Створено комплекс математичних моделей, які реалізують їх алгоритми та обчислювальні програми, які дозволяють: визначати оптимальні параметри процесу модифікування розплаву чавуну в ковші порошковим дротом; прогнозувати процес утворення та формування НВ

змінного складу в рідкій фазі дендритної комірки;аналізувати термонапружений стан відливка в ході його кристалізації та твердження для прогнозування найбільш імовірних місць появи тріщин.

Розроблена концепція використання інтегрованих гібридних експертних систем для дослідження та проектування теплових процесів у ливарних технологіях.

Практична цінність роботи. Більшість результатів досліджень, проведених в роботі, було отримано и впроваджено при виконанні гос- та держбюджетних тем в рамках науково - технічних програм та планів міністерства освіти України. Тематика та зміст дисертації відповідають головним напрямам та задачам реформування економики України з метою енерго- та ресурсозбереження в металургійному виробництві.

У НВП "Темп" (м.Москва) впроваджені з соціальним та науково-технічним ефектом методика та програма чисельного моделювання тепломасопереносу та процесу формування НВ змінного складу під час твердження відливків з високоміцного чавуну.

У Дніпродзержинському ДТУ впроваджені методика та програма чисельного моделювання процесу формування НВ змінного складу в рідких та тверднучих сплавах на основі заліза з урахуванням нерівноважного ходу їх твердження, що дозволяє прогнозувати параметри та місця локалізації включень.

У НВВФ "Метал" (м. Донецьк) впроваджені методика та програма розрахунку гідродинамічних та теплофізичних процесів при модифікуванні чавуна в ковші порошковим дротом з магнієвим наповнювачем.На Магнітогорському та Новолипецькому МК випробовані запропоновані раціональні параметри технологічного процесу, що дозволило звести до мінімуму виплески розплаву з ковша.

У ДМетАУ (м.Дніпропетровськ) впроваджені алгоритм та програма розрахунку гідродинамічних та теплофізичних процесів при формуванні відцентроволитих біметалевих відливків,а також досліджено їх термонапружений стан при різних режимах охолодження. У промислових умовах на Нікопольському південно-трубному заводі випробовані запропоновані оптимальні параметри процесу та підтверджені висновки про доцільність вибору природного виду охолодження у порівнянні з охолодженням пакетами у колодязях,через те що в останньому випадку імовірність тріщинотворення більш висока.

Усі зазначені програмні засоби зареєстровані в ГФАП.

Апробація роботи.Основні результати та положення роботи док-

ладались і обмірковувались на: V-й Всесоюзній науково - технічній конференції "Проблеми кристалізації сплавів та комп'ютерне моделювання", Іжевськ,1990; II-й республіканській школі-семінарі "Методи математичного моделювання у наукових дослідженнях", Донецьк, 1990; I-й Міжнародній конференції "Чисельні методи у гідравлиці та гідродинаміці", Донецьк, 1994; VI-й Міжнародній науково-технічній конференції "Кристалізация:ком'пьютерні моделі, експеримент, технології", Іжевськ, 1994; 3-х ВУЗівських наукових конференціях професорсько-викладацького складу за підсумками НДР,Донецьк,1991, 1993, 1995 р.р.

Публікації.За матеріалами дисертації опубліковано 23 работи.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури на 12 сторінках з 121 назв, додатку на 9 сторінках та має 144 сторінки машинописного тексту, 51 малюнка і 9 таблиць.

Робота виконана у лабораторії математичного моделювання тепломасообмінних процесів при кафедрі фізичної гідродинаміки (з 1990 р. - кафедра фізики нерівноважних процесів та екології),а також у аспірантурі Донецького державного університету.

На захист виносяться наступні наукові положення:

математична модель,метод чисельної реалізації та результати чисельного дослідження теплообмінних процесів при твердненні відливків з високоміцного чавуну з урахуванням просторової неоднорідності у розподілі твердої фази та різниці теплоємностей твердої і рідкої фаз, а також виділення захованої теплоти кристалізації структурних складових чавуну при фазових переходах у розплаві, у тривимірної постановці;

комплекс математичних моделей,методи їх чисельної реалізації та результати чисельного дослідження: процесу утворення і формування НВ змінного складу у рідкій фазі дендритної комірки;термонапруженого стану відливка з урахуванням пружної, пружно - пластичної та в'язко-пружної поведінки матеріалу відливка в ході його кристалізації і твердження; процесу модифікування розплаву чавуну у ковші порошковим дротом;

встановлені в результаті обчислювального експерименту закономірності теплообміну та фазових переходів;

розроблені програмні засоби, включаючи експертні системи,заради дослідження та проектування теплових процесів.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дається загальна характеристика роботи, визначається її актуальність, новизна, мета та основні положення, що виносяться на захист.

У першому розділі розглянуті основні задачі технології одержування високоякісних чавунів, приведені результати сучасних досліджень процесів твердіння чавунів, а також відзначені достойності і недоліки існуючих математичних моделей процесів тверднення та кристалізації та методів їх реалізації. На підставі цього побудована фізична модель процесу та виконана постановка задачі дослідження.

У другому розділі описані математичні моделі процесів теплообміну, формування НВ змінного складу та термонапруженого стану відливка.

У роботі розглядається вісесиметричний випадок циліндричного відливка радіусу r в кокілі прямокутної форми з товщиною стінки h (мал.I). Математична модель процесу тверднення включає в себе рівняння теплопереносу, що описується нестаціонарним тривимірним рівнянням теплопровідності

$$c_e\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_e\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_e\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_e\frac{\partial T}{\partial z}\right), \qquad (1)$$

де c_e -ефективна теплоємність, яка дорівнює в рідкій фазі $\rho_p c_p$, в ДФЗ $\xi\rho_т c_т + \rho_p c_p(1-\xi) - Q\rho_т(\partial\xi/\partial T)$, в твердій фазі $\rho_т c_т$ та в оснащенні $\rho_к c_к$; λ_e - ефективна теплопровідність, дорівнює в рідкій фазі λ_p, в ДФЗ $\xi\lambda_т + \lambda_ж(1-\xi)$, в твердій фазі $\lambda_т$ та в оснащенні $\lambda_к$; ξ - частка твердої фази, визначувана з рівняння для нерівноважного важеля

$$\xi = 1-\left(\frac{T_o-T}{T_o-T_L}\right)^{-1/(1-k_o)}, \qquad (2)$$

k_o-рівноважний коефіцієнт розподілу вуглецю, який відповідає діаграмі стану сплаву та залежний від концентрації вуглецю; Q -захована теплота кристалізації чавуну; T, T_o, T_L, T_s - поточна, початкова, ліквідус і солідус температури; ρ_p, $\rho_т$- густина рідкої та твердої фаз чавуну; $c_к$- питома теплоємність, $\rho_к$- густина і $\lambda_к$-теплопровідність матеріалу оснащення.

Зважаючи на те, що характерні розміри досліджуваної галузі не перевищують кілька сантиметрів та перетрівання розплаву знімається досить швидко, у розглядаємій постановці допустимо знехтувати

природно-конвективним перемішуванням рідкого ядра (число Релея для досліджуваних інтервалів значень параметрів не перевищує 10^4).

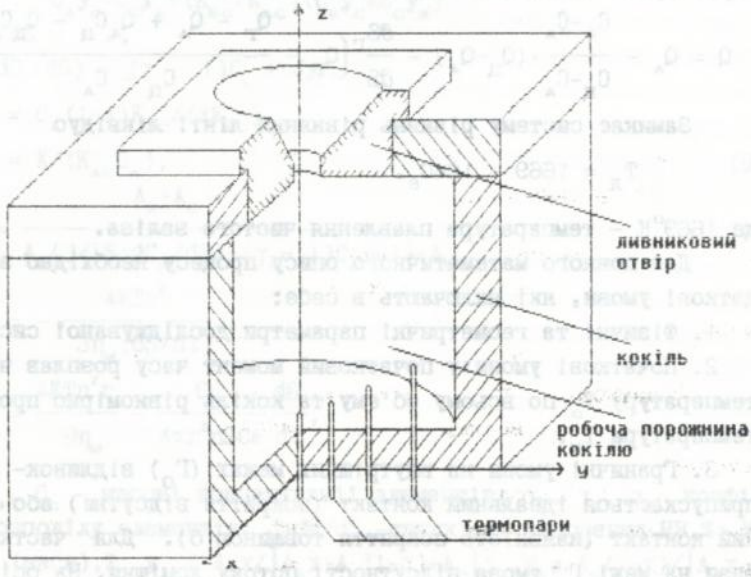
При евтектичному переході виділяється теплота кристалізації структурних складових: $Q_Ц$ цементиту, $Q_А$ аустеніту і $Q_Г$ графіту. Заради урахування теплоти кристалізації Q, яка виділяється, пропонується наступний спосіб. При розв'язанні рівняння (1) джерело тепла кристалізації евтектики обчислюється як суперпозиція джерел тепла окремих фаз структурних складових:

$$Q\frac{\partial S}{\partial t} = Q_Ц\frac{\partial S_Ц}{\partial t} + Q_А\frac{\partial S_А}{\partial t} + Q_Г\frac{\partial S_Г}{\partial t}, \qquad (3)$$

де $S=1-\xi$ - частка рідкої фази чавуну, $S_А$, $S_Ц$ - частки аустеніту та цементиту при евтектичному перетворенні, визначувані з розв'язку системи рівнянь балансу фаз і концентрацій

$$\begin{cases} S_Ц + S_А + S_Г = S_e - S, \\ C_Ц \cdot S_Ц + C_А \cdot S_А + S_Г = C_e \cdot (S_e - S); \end{cases} \qquad (4)$$

де $C_А$, $C_Ц$ - концентрація вуглецю в аустеніті та цементиті, $S_Г$ - част-



Мал.1. Схема досліджуваної галузі.

ка графіту, $S_Г = S_Г^{max} g S_e$.

Максимальне значення частки графіту $S_Г^{max}$ знаходиться з умов балансу концентрацій при $C=C_e$ в рідкій фазі ($S=S_A + S_Г=1$), $C=C_A$ в аустеніті ($S_A=1-S_Г$), і $C_Г=1$ в графіті ($S_Г = S_Г^{max}$, цементит у цьому випадку не утворюється):

$$S_Г^{max} = \frac{C_e - C_A}{1 - C_A}. \qquad (5)$$

Тут C_e=%C + 0,3(%Si) - вуглецевий еквівалент, який визначає положення вуглецевої евтектики в багатокомпонентнім сплаві.

Ступінь графітизації чавуну q знаходиться з структурної діаграми Баландіна Г.Ф., $q=C_Г/C_{заг}$, $C_{заг}$ - загальний вміст вуглецю.

Ступінь евтектичності доевтектичних чавунів S_e розраховується за відомою формулою Баландіна Г.Ф.

$$S_e = \frac{\%C + 0{,}15(\%Si) - 2}{2{,}25 - 0{,}15(\%Si)}, \qquad (6)$$

де %C і %Si - процентний вміст вуглецю та кремнію у чавуні. Формула дозволяє з дуже невеликими похибками розраховувати S_e сірих та високоміцних чавунів.

Рівняння для Q з урахуванням виділення теплоти кристалізації структурних складових чавуну має такий вигляд:

$$Q = Q_A - \frac{C_e - C_A}{C_Ц - C_A}\cdot(Q_Ц - Q_A) - \frac{\partial S_Г}{\partial S}\left[Q_Г - \frac{Q_Г - Q_A + Q_A C_Ц - Q_Ц C_A}{C_Ц - C_A}\right]. \qquad (7)$$

Замикає систему рівнянь рівняння лінії ліквідус

$$T_Л = 1669 - 124C_e. \qquad (8)$$

де 1669°К - температура плавлення чистого заліза.

Для повного математичного опису процесу необхідно задати додаткові умови, які включають в себе:

1. Фізичні та геометричні параметри досліджуваної системи.

2. Початкові умови: у початковий момент часу розплав чавуну має температуру T_o по всьому об'єму та кокіль рівномірно прогрітий до температури T_K.

3. Граничні умови на внутрішніх межах ($Г_o$) відливок- оснащення припускається ідеальний контакт (покриття відсутнє) або неідеальний контакт (наявність покриття товщиною δ). Для частки твердої фази на межі $Г_o$ умова відсутності потоку домішки. На осі симетрії задається умова відсутності потоку тепла; на межі стіна кокіля -

оточуюче середовище граничні умови 3-го роду.

Рівняння (1)-(8) утворюють замкнену систему рівнянь, розв'язання якої при відповідних початкових та граничних умовах дозволяє простежити зміну температури та частки твердої фази в будь-якій розрахунковій точці відливка у часі.

На основі теорії Борісова В. Т. утворення НВ змінного складу в ДФЗ зливка, який кристалізується, розроблена стосовно процесу тверднення чавунних відливків фізична модель утворення та зростання НВ в елементарній комірці ДФЗ циліндричної форми та зроблено спробу виявлення можливостей моделі та факторів, на основі яких вона може бути зіставлена с експериментом.

Розглядається утворення та зростання НВ в результаті хімічної реакції типу $x\cdot[A]+(1-x)\cdot[B]+[C]=[A]_x[B]_{1-x}[C]$, де x-склад НВ, мольні частки; [A],[B],[C] - хімічні елементи; $[A]_x[B]_{1-x}[C]$ - НВ змінного складу типу сульфідів $Mn_xFe_{1-x}S$, нітридів $Ti_xAl_{1-x}N$ або оксидів $(Al_2O_3)_x(SiO_2)_{1-x}$. Утворення НВ типу $[A]_x[B]_{1-x}[C]$ описується системой рівнянь:

$$
\begin{cases}
J=\dfrac{(K_{BC}/K_{AC})C_BC_C(2-\gamma_C-\gamma_B)+C_AC_C(2-\gamma_A-\gamma_C)}{C_Ay_C+C_Cy_A+(K_{BC}/K_{AC})(C_By_C+C_Cy_B)},\\
dM/dS=-J,\\
S(dC_i/dS)=(\gamma_i-1)C_i+Jy_i,\\
C_B=C_A(1-x)K_{AC}/(xK_{BC}),\\
C_C=X/(K_{AC}C_A),\\
X=\dfrac{A_B+A_C}{A_A\{J/[S(dC_A/dS)-(\gamma_A-1)C_A]-1\}+A_B},\\
\dfrac{dn}{dS}=-\dfrac{4KTn^2}{3\eta_M(dS/dt)},\\
\dfrac{dr}{dS}=\dfrac{4KTn^2r}{9\eta_M}-\dfrac{C_4}{4\pi r^2nSC_2}\cdot\dfrac{dS}{dt},
\end{cases}
\tag{9}
$$

де C_A, C_B, C_C - масові концентрації елементів; γ_A, γ_B, γ_C- коефіцієнти розподілу елементів; J=dM/dS -швидкість утворення НВ,%; M-їх вміст (маса),%; $y_A=A_Ax/\left[A_Ax+A_B(1-x)+A_C\right]$; $y_B=A_B(1-x)/\left[A_Ax+A_B(1-x)+A_C\right]$; $y_C=A_C/\left[A_Ax+A_B(1-x)+A_C\right]$, A_A,A_B,A_C -атомні маси реагентів,кг/моль; dS/dt= -dξ/dt, ξ знаходиться згідно з виражен-

ням (2); n и r-кількість в одиниці об'єму розплаву та радіус частинок НВ. Рівняння (9) не виключають того, що в комірці відбувається захоплення та коагуляція частинок.

Температурні залежності констант рівноваги K_{AC} для реакції [A]+[C]=(AC) та K_{BC} для реакції [B]+[C]=(BC) приймалися такими: $lgK_{ij}= -\Delta G_{ij}/2,3RT$, $i,j=A,B,C;\ i\neq j$, де $\Delta G_{ij}=a/T+b$, Дж/моль-вільна енергія утворення НВ;a і b знаходяться з табличних даних, R -універсальна газова стала.

Перенос НВ у рідкому чавуні здійснюється або рухом частинок відносно середовища, або конвекційними потоками металу. Кількісна оцінка швидкості спливання v сферичного твердого включення густиною $\rho_в$ у в'язкій рідині з густиною $\rho_м$ та коефіцієнтом динамічної в'язкості $\eta_м$ під впливом гравітаційних сил визначалась за формулою Стокса:

$$v= 2gr^2(\rho_м-\rho_в)/9\eta_м. \qquad (10)$$

Недолік експериментальних даних за визначенням термічних напруг (ТН) у процесі твердіння відливка не дає підстав для того, щоб віддати перевагу якій - небудь з існуючих реологічних моделей механічної поведінки металів та сплавів при температурах близько точки плавлення: в'язко-пружної поведінки (модель ідеалізованого тіла Максвела), пружно-в'язко-пластичної поведінки (моделі Болі - Уейнера, Баландіна-Каширцева), та при температурах евтектичних та евтектоїдних перетворень пружно-пластичної поведінки (модель Абрамова В. В. та інших). Тому була зроблена спроба показати важливість урахування явищ нарощування твердої кірки відливка, релаксації ТН та фазових перетворень, а також показати можливості ЭОМ при розв'язанні цієї задачі.

При визначенні ТН з урахуванням ефекту нарощування твердої кірки відливка (при постійних коефіцієнтах лінійного розширення β, модулі пружності E та модулі зсування G) на основі розв'язання системи рівнянь, які запропоновані Пальмовим В. А., одержані наступні вираження для ТН в циліндричній оболочці:

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial t}= \frac{\beta E}{1-\nu}\cdot\frac{1}{r^2}\left[\frac{r^2-b^2}{R^2-b^2}\int_b^R r\frac{\partial T}{\partial\omega}\cdot\frac{d\omega}{dt}dr - \int_b^r r\frac{\partial T}{\partial\omega}\cdot\frac{d\omega}{dt}dr\right], \qquad (11)$$

$$\frac{\partial\sigma_\tau}{\partial t}= \frac{\beta E}{1-\nu}\cdot\frac{1}{r^2}\left[\frac{r^2+b^2}{R^2-b^2}\int_b^R r\frac{\partial T}{\partial\omega}\cdot\frac{d\omega}{dt}dr + \int_b^r r\frac{\partial T}{\partial\omega}\cdot\frac{d\omega}{dt}dr - r^2\frac{\partial T}{\partial\omega}\cdot\frac{d\omega}{dt}\right], \qquad (12)$$

де σ_r і σ_τ - радіальна та тангенціальна компоненти тензора напружень, $\omega=R-b$ - товщина твердої оболонки відливка, R - радіус відливка, b - радіус рідкої частини відливка, r - текучий радіус.

Математична модель розрахунку ТН з урахуванням ефекту релаксації напруг, коли час релаксації материалу відливка $\tau=\eta_м/G$ ($G=E/2(1+\nu)$, ν-коефіцієнт Пуассона) облічує той факт,що для відливка циліндричної форми на бокових поверхнях, вільних від зовнішніх навантажень, відмінні від нуля лише компоненти тензора $\sigma_r=\sigma_\tau$, у зв'язку з чим $\sigma=2\sigma_r$.

З цього виходе, що рівняння для $\sigma=\sigma(r,t)$ має вигляд:

$$\sigma(r,t)=\int_r^\omega \frac{\beta E}{1-\nu}\left[\frac{1}{\omega}\int_0^\omega \frac{\partial T}{\partial \omega}\,dr-\frac{\partial T}{\partial \omega}\right]\cdot exp\left[-\frac{1+\nu}{3(1-\nu)}\int_{t_*}^{t}\frac{dt}{\tau}\right]d\omega. \qquad (14)$$

Параметр t_* характеризує тривалість досягнення фронтом кристалізації координати r, коли виконується умова $\sigma=0$.

При визначенні ТН з урахуванням фазових перетворень при евтектичних та евтектоїдних переходах пружні параметри покладаються змінними (залежними від температури).Поведінка матеріалу відливка носить пружнопластичний характер.Нормальні напруги визначались за формулами, які запропоновані Абрамовим В.В.:

$$\sigma_z=(e_z-\delta)\frac{E}{1-\mu},\quad \sigma_r=(e_z-e_{zo})\frac{a}{2(1-\mu)},\quad \sigma_\tau=\sigma_z-\sigma_r, \qquad (15)$$

де $e_z=\int_F \delta E dF/\int_F E dF$ - відносна осьова деформація відливка при зовсім пружної деформації; $e_{zo}=\int_{dF}\delta E dF/\int_{dF} E dF$ - відносна осьова деформація одного шару відливка; $a=\int_{dF} E dF/\int_{dF} dF$; dF - площа перерізу окремого шару циліндричного відливка, F - площа перерізу відливка.

Проведено аналіз різницевих методів розрахунку з точки зору можливості та доцільності їх застосування для розв'язання системи тривимірних нелінійних диференціальних рівнянь у частинних похідних та виконана її кінцево-різницева апроксимація з застосуванням явної схеми.Побудовані обчислювальні алгоритми,які реалізують вищевикладені математичні моделі.

<u>У третьому розділі</u> проведено чисельне дослідження теплофізичних процесів при твердненні відливка з високоміцного чавуну.Зроблено порівняльний аналіз результатів розрахунку твердіння відливків у сталевому та чавунному кокілях та в земляній формі при наявності термоізоляційного цирконового покриття (мастила) та без

нього (мал. 2, а,б). Задача розв'язувалась стосовно відливків циліндрів поршнів двигунів внутрішнього згоряння, які одержуються литвом у кокіль у НВП "Темп", проте доведений алгоритм може застосовуватися для розрахунку температурних полей відливків інших розмірів, які одержуються литвом у кокіль.

Аналіз отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки:

використання цирконового покриття призводить до зміщення теплового центру до верхньої частини відливка (мал. 2,б) у порівнянні з випадком вісутності мастила (мал. 2,а) та твердненням відливків у земляній формі,причому цей ефект виявляється як для сталевого, так і для чавунного кокілю;

при твердненні відливка в оснащенні з високоміцного чавуну без мастила (мал. 2,а) спостерігається більш значний прогрів оснащення у порівнянні з випадком використання сталевого кокіля;

при твердненні відливка у земляній формі подібне температурне поле можливо одержати при твердненні у чавуннім кокілі за товщиною мастила 1мм та початковій температурі кокіля 350°С;

при товщині мастила h=0,5мм на висоті 10 мм від дна форми температура чавуну підвищується більш як на 100°С у порівнянні з випадком відсутності мастила.Збільшення товщини мастила до 1мм призводить до підвищення температури чавуну ще на 55°С. Використання мастила призводить до зменьшення градієнту температур у відливку та їх збільшення у кокілі;

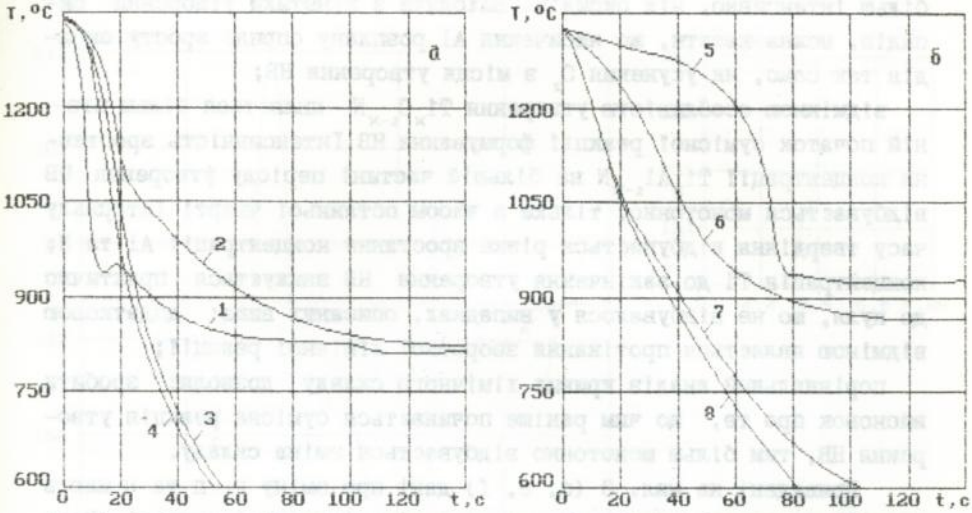
в ході обчислювального експерименту на друк виводились графіки залежності від температури у фіксованих точках відливка, які відповідають місцям встановлення термопар (мал.I). Порівняння одержаних результатів з експериментальними даними дозволило уточнити математичну модель процесу.

На основі математичної моделі утворення та зросту НВ проведено чисельне дослідження кінетики формування $Mn_xFe_{1-x}S$; оксидів $(Al_2O_3)_x(SiO_2)_{1-x}$; $Ti_xC_{1-x}N$ та $Ti_xAl_{1-x}N$ (мал. 3).

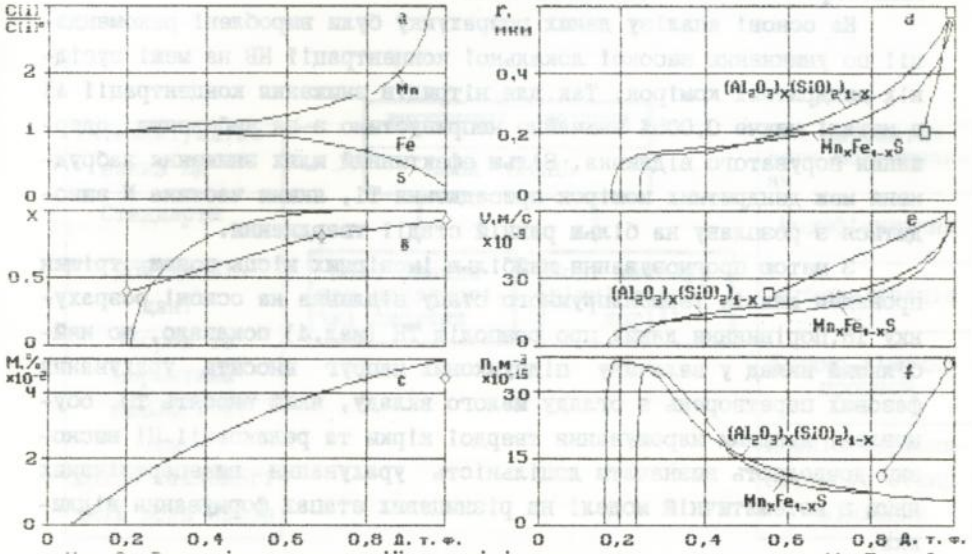
Встановлено, що:

для утворення сульфідів $Mn_xFe_{1-x}S$ досить тої кількості Mn і S, яка присутня у розплаві чавуну.Цей висновок підтверджується даними,які одержав Борісов В.Т. та інші. Для того,щоб сповільнити реакцію утворення сульфідів, необхідно не допускати надмірного збільшення концентрації Mn у розплаві;

за значенням концентрації оксидів у 1,5 -2 рази більш, ніж сульфідів. Зміна концентрації компонентів сульфідів відбувається



Мал.2. Зміна в часі температури на термопарі r=26мм [а] та r=0мм [б] для відливка з високоміцного чавуну: 1,5 – експериментальні дані в земляній формі; 2,6-розрахункові дані для земляної форми; розрахункові дані для чавунного оснащення:3-без настила; 7-1мм настила; 8-0,5мм настила;4-розрахункові дані для сталевого оснащення (без настила).



Мал.3. Розподіл концентрації [а],хімічного складу [в],маси [г] $Mn_xFe_{1-x}S$ розміру [д], швидкості сплавання [е] та числа [ж] включень залежно від частки твердої фази. —— дані чисельного розрахунку; ◇ - дані Борисова В.Т. та інших; □ - за даними Гиршовича Н.Г.; ○ - за даними Попеля С.І.

більш інтенсивно, ніж оксидів. Виходячи з кінетики утворення оксидів, можна казати, що насичення Al розплаву сприяє зросту оксидів так само, як усунення O_2 з місця утворення НВ;

відмінною особливістю утворення $Ti_xC_{1-x}N$ являється більш пізній початок сумісної реакції формування НВ.Інтенсивність зростання концентрації $Ti_xAl_{1-x}N$ на більшій частині періоду утворення НВ відбувається монотонно, тільки з часом останньої чверті інтервалу часу твердіння відбувається різке зростання концентрації Al та N; концентрація Ti до закінчення утворення НВ знижується практично до нуля, що не відбувалося у випадках, описаних вище; додатковою відміною являється протікання зворотної хімічної реакції;

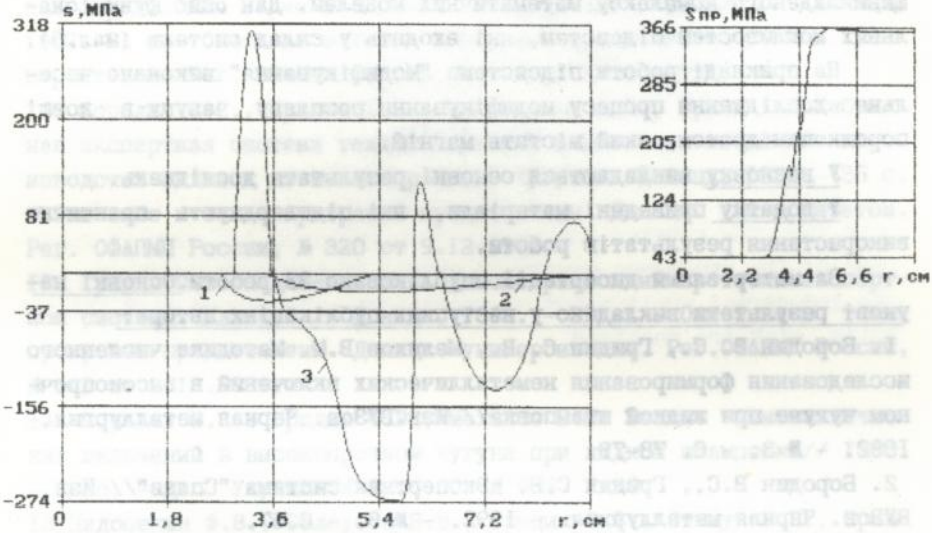
порівняльний аналіз кривих хімічного складу дозволяє зробити висновок про те, що чим раніше починається сумісна реакція утворення НВ, тим більш монотонно відбувається зміна складу.

Приведені на мал. 3 (d, e, f) дані про зміну г, n та υ мають схожий вигляд як у якісному, так і в кількісному відношенні. Необхідно тільки звернути увагу на те,що утворення НВ відбувається в різні моменти часу, але для кожного типу НВ вигляд закономірності зміни г,n та υ не суперечить загальприйнятій теорії кінетики формування НВ, що підтверджується порівнянням одержаних даних з даними Гиршовича М.Г. та Попеля С.І.

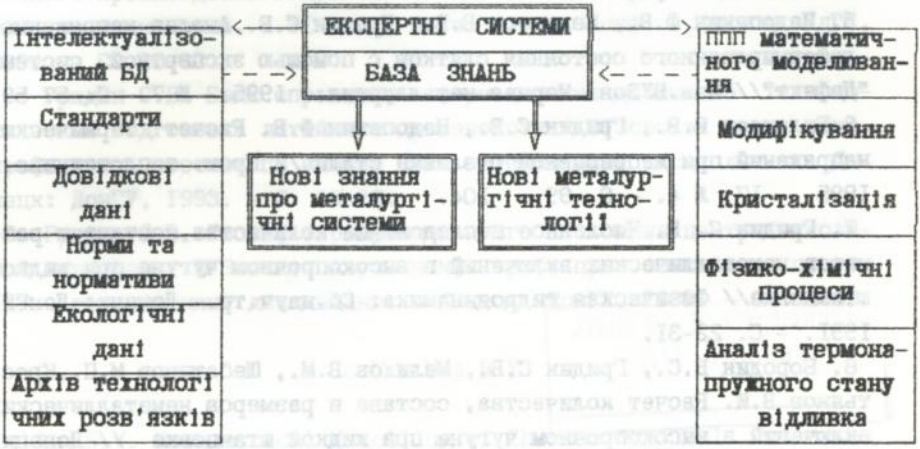
На основі аналізу даних розрахунку були вироблені рекомендації по уникненню високої локальної концентрації НВ на межі сусідніх дендритних комірок. Так,для нітридів зниження концентрації Al в металі нижче 0,005% звичайно неприпустимо з-за небезпеки одержання поруватого відливка. Більш ефективний шлях зниження забруднення меж дендритних комірок-присадження Ti, якими частина N виводиться з розплаву на більш ранній стадії твердження.

З метою прогнозування найбільш імовірних місць появи тріщин проведен аналіз термонапружного стану відливка на основі розрахунку ТН.Порівняння даних про розподіл ТН (мал.4) показало, що найбільший вклад у величину підсумкових напруг вносить урахування фазових перетворень з огляду малого вкладу, який вносять ТН, обумовлені явищами нарощування твердої кірки та релаксації.Ці висновки дозволяють визначати доцільність урахування вищеперелічених явищ в математичній моделі на різницевих етапах формування відливка.

У четвертому розділі приведена концепція використання інтегрованих гібридних експертних систем для дослідження та проекту-



Мал.4. Радіальні напруги та межа міцності удовж радіуса відливка.Поздовжня координата z=0,06м. Твердіння у сталевому оснащенні, мастило 1мм, 1- з урахуванням ефекту нарощування; 2 - з урахуванням фазових перетворень. Текучий час - 10,0с.



Мал. 5. Функціональна схема інтегрованої гібридної експертної системи: —— - керування, - - - - інформація.

вання теплових процесів у ливарних технологіях, з урахуванням вищевикладеного комплексу математичних моделей. Дан опис функціональних можливостей підсистем, які входять у склад системи (мал.5).

На прикладі роботи підсистеми "Модифікування" виконано чисельне дослідження процесу модифікування розплаву чавуну в ковші порошковим дротом, який містить магній.

У висновку викладаються основні результати досліджень.

У додатку приведені матеріали, які підтверджують практичне використання результатів роботи.

За матеріалами дисертації опубліковано 23 роботи. Основні наукові результати викладено у наступних публікаціях автора:

I. Бородин В. С., Гридин С. В., Мелихов В.М. Методика численного исследования формирования неметаллических включений в высокопрочном чугуне при жидкой штамповке// Изв.ВУЗов. Черная металлургия.- 1992. - № 3. - С. 78-79.

2. Бородин В.С., Гридин С.В. Экспертная система "Сплав"// Изв. ВУЗов. Черная металлургия. - 1992. - № 9. - С.67.

3. Бородин В.С., Гридин С.В., Мелихов В.М., Петренко Л.П. Математическое моделирование теплопереноса при затвердевании под давлением чугунных отливок// Процессы литья.- 1992.- № 3.- С. 18-22.

4. Бородин В.С., Голод В.И., Гридин С.В., Крестьянов В.И., Каргин А.А., Цыбуленко Е.В. Проект экспертной системы для автоматизированной подготовки производства литых заготовок из высокопрочных чугунов// Процессы литья. - 1992. - № 4. - С. 36-39.

5. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гридин С.В. Анализ напряженно--деформированного состояния слитков с помощью экспертной системы "Дефект"// Изв.ВУЗов. Черная металлургия.- 1995.- № 7.- С. 57-59.

6.Белоусов В.В., Гридин С.В., Недопекин Ф.В. Расчет термических напряжений при непрерывной разливке стали // Пром. теплотехника.- 1995. - 17, № 4. - С. 99 - 104.

7. Гридин С. В. Численное исследование количества,состава и размеров неметаллических включений в высокопрочном чугуне при жидкой штамповке// Физическая гидродинамика: Сб.науч.тр.- Донецк: ДонГУ, 1991. - С. 22-31.

8. Бородин В.С., Гридин С.В., Мелихов В.М., Шебатинов М.П.,Крестьянов В.И. Расчет количества, состава и размеров неметаллических включений в высокопрочном чугуне при жидкой штамповке // Донецк, 1991. - 37 с. - Описание и текст программы представлены Донецк. университетом. Рег. ОФАПМО СССР, рег. № 311 от 25.04.1991.

9. Бородин В.С., Гридин С.В., Крестьянов В.И. Экспертная система для определения марки и состава высокопрочного чугуна // Донецк, 1992.-34 с.- Описание и текст программы представлены Донецк. университетом. Рег. ОФАПМП России, № 314 от 22.04.1992.

10. Бородин В.С., Гридин С.В., Крестьянов В.И., Юркин А.В.Гибридная экспертная система технологической подготовки литейного производства отливок из высокопрочного чугуна// Донецк, 1992.- 36 с. - Описание и текст программы представлены Донецк. университетом. Рег. ОФАПМП России, № 320 от 9.12.1992.

11. Гридин С.В.,Недопекин Ф.В. Демонстрационный прототип экспертной системы "Плавка" // Донецк, 1992. - 21 с. - Описание и текст программы представлены Донецк. университетом. Рег.ОФАПМП России, № 321 от 9.12.1992.

12. Бородин В.С., Гридин С.В., Мелихов В.М. Расчет неметаллических включений в высокопрочном чугуне при жидкой штамповке// 1990. - 20 с. - Деп. УкрНИИНТИ 8.06.90. № 992- Ук90.

13 Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гридин С.В., Онищук В.П., Гринберг С.Е., Овчинников Н.А., Писаренко Ф.А. Компьютерное моделирование процессов гидродинамики и тепломассопереноса при обработке расплава порошковыми проволоками (ПП)//Численные методы в гидравлике и гидродинамике: I межд.конф.- Донецк: ДонГУ, 1994.-С.83-85.

14. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гридин С.В.Интегрированная гибридная экспертная система (ИГЭС) технологической подготовки литейного производства// Кристаллизация: компьютерные модели,эксперимент, технологии. : VI межд. науч.- техн. конф. - Ижевск: УдГУ, 1994. - С. 80-82.

15. Гридин С.В. Банк справочно-информационных данных по технологической подготовке литейного производства//ВУЗовская науч. конф. проф.-преп. состава по итогам НИР: естественные дисциплины: - Донецк: ДонГУ, 1993. - С. 19-20.

16. Гридин С.В. Расчет термонапряженного состояния центробежнолитой заготовки//ВУЗовская науч. конф. проф.-преп.состава по итогам НИР: естественные дисциплины: - Донецк: ДонГУ, 1995. - С. 48-49.

S U M M A R Y

Gridin S.V. Mathematical Modelling of Thermal Physical Processes during of Solidification of Cast Iron Ingots.Dissertation for the scientific degree of Candidate of Science (Eng.). Speciality

05.16.02 - ferrous metals metallurgy, the State Technical Univercity, Dneprodzerginsk, 1996, manuscript, 225 p., 9 tables, 51 figures, bibliography - 121 titles.

The complex of mathematical methods has been created and the mathematical models of heat transfer processes in two-phase medias on the basis of cast iron melting was developed. Methods which assumes the computer realization and serve as the mean of solving for definition of technological parameters of solidification of cast iron.The created models has been employed for complex recerches of the processes mentioned above. It has been carried out the industreal application of technologies developed with the results, wich are received.

Аннотація

Грідін С.В.Математичне моделювання теплофізичних процесів під час твердження відливків з високоміцного чавуну.Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 - металургія чорних металів,Дніпродзержинський державний технічний університет, Дніпродзержинськ, 1996. Рукопис, 225 с., 9 табл., 51 мал., 121 бібліогр. назв.

Створено комплекс математичних методів та математичних моделей процесів теплопереносу у двофазній зоні розплаву чавуну. Методи припускають комп'ютерну реалізацію та дозволяють визначати технологічні параметри твердження відливків з високоміцного чавуну. Розроблені моделі дають можливість виконувати комплексне дослідження вищеназваних процесів. Результати досліджень впроваджені у промислове виробництво.

Ключові слова: високоміцний чавун, теплофізичні процеси, твердження, відливок, математичне моделювання.

Грідін Сергій Васильович

Підписано до друку 29.02.1996р. Замовлення № 56.
Тираж 100 прим. Спосіб друку офсетний
ПО "Чайка", м. Донецьк-50, пр.Театральний, 13