

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДНІПРОДЗЕРЖИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ЯЛОВИЙ Микола Іванович

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА КОМПЛЕКСНЕ
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ
МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА З МЕТОЮ
УДОСКОНАЛЕННЯ ЙОГО ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 05.16.02 - "Металургія
чорних металів"

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпродзержинськ - 1995

669.11.8

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00761474 (T)

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Дніпродзержинському університеті.

Офіційні опоненти:

1. Професор, докт. техн. наук Беляев М.М.
2. Професор, докт. техн. наук Губинський В.Й.
3. Професор, докт. техн. наук Постольник Ю.С.

Провідне підприємство

Дніпродзержинський металургійний комбінат

Захист дисертації відбудеться "24" Окт 1995 р. о год. хвил.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д- 068.02.02
при Дніпродзержинському державному технічному університеті
Адреса: 322618, Дніпропетровська обл., м. Дніпродзержинськ,
вул. Дніпробудівська, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Дніпродзержинського державного технічного університету.

Автореферат розісланий "21" сент. 1995 г.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
професор, доктор технічних наук

Чернов М.М.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Металургійне виробництво являє собою складний технологічний ланцюг фізико-хімічних та теплотехнічних процесів, у яких явища тепломасопереносу супроводжуються фазовими перетвореннями об'єкта, його деформацією, внутрішнім конвективним масопереносом, дисипацією енергії формозмінювання та ін. Характерними із згаданих процесів є: плавлення металів, твердіння, охолодження та нагрів зливків, а також обробка металів тиском.

Подальше удосконалення технології виробництва у чорній металургії неможливе без комплексних досліджень теплових явищ, які проходять у вказаних процесах. Ці дослідження необхідні не тільки для врахування заданих по технології теплових змін в об'єктах, що обробляються, але також для розробки енергозберігаючих технологій, що особливо важливо у цей час для чорної металургії України у тій ситуації, що склалась з її енергозабезпеченням. У зв'язку з цим зростає актуальність математичних та експериментальних досліджень теплових процесів металургії. Експериментальні дослідження поки що дуже трудомісткі та дорогі, а отримана з їх допомогою інформація має обмежений та неточний характер.

Ось чому у даній праці основну увагу приділено подальшому розвитку математичних методів, що моделюють теплові процеси чорної металургії та дають не менш точну інформацію, ніж інструментальні дослідження, являючись в той же час менш дорогими, але більш загальними. Зокрема, був розроблений новий математичний підхід до розв'язання задач тепломасообміну, що відбувається у згаданих вище процесах металургійної переробки. По суті цей підхід являється аналітичним і долягає у послідовному застосуванні редукції первинної системи диференціальних рівнянь

та процедури параметричного збурення (скорочено метод РПЗ). Крім того, для розв'язання ускладнених задач тепломасообміну (на прикладі дослідження температурного поля порожнистої циліндричної заготовки, що підлягає деформації, із врахуванням внутрішнього конвективного масопереносу, дисипації механічної енергії формозмінювання та залежності коефіцієнтів тепломасопереносу від температури) розроблена і реалізована на ЕОМ скінченно-різницева схема.

Мета роботи

Подальше удосконалення технології металургійного виробництва, розв'язання його актуальних задач для виявлення та економії енергоресурсів, а також для розробки енергозберігаючих технологій на базі розвитку теорії тепломасообміну, розробки математичних моделей (аналітичних та чисельних) та їх використання для комплексного дослідження теплових процесів при здійсненні основних стадій металургійної переробки: плавлення, затвердіння, нагріву у нагрівних колодязях металу та його наступної обробки тиском.

Наукова новизна

Запропонована нова математична модель розв'язування задач теплопровідності, що мають різну форму нелінійності - метод РПЗ. Безпосередньому застосуванню процедури параметричного збурення передує редукція, тобто зменшення кількості залежних змінних у початковій системі диференціальних рівнянь, в результаті чого ця система трансформується (в залежності від типу задачі, що має бути розв'язана) у нелінійні звичайні, функціональні або інтегральні рівняння.

На основі методу РПЗ у цій роботі були знайдені аналітичні розв'язання задачі теплопровідності для об'єктів, що мають на протязі технологічних операцій металургійної переробки рухому межу

розділення фаз (плавлення, твердіння, нагрів зливків з рідкою серцевиною, обробка тиском), а також для тих частин металургійного обладнання, що знаходяться під високоінтенсивним тепловим впливом. Задачі плавлення та затвердіння металів вивчались раніше іншими дослідниками. Але результати, одержані автором цієї дисертації, являються більш загальними, бо враховують довільний початковий розподіл температури по перерізу об'єкту, що обробляється, а також дають можливість визначити як закон руху межі розподілу фаз так і характер температурних змін по його об'єму. Що стосується дослідження температурного поля тіла в процесі його обробки тиском з врахуванням внутрішнього масопереносу та тепловідлення, а також змінювання його розміру, то воно, по суті справи, тільки розпочинає свій розвиток.

Окрім сказаного, в дисертації розглянуто ускладнений варіант задачі теплопровідності, коли є доцільним застосування чисельних методів. Справа йде про вивчення температурного поля порожнистої циліндричної гільзи в процесі її прокатки з врахуванням двовимірності поля, переміщення в просторі границь досліджуваного об'єкта, внутрішньої течії металу, дисипації енергії пластичного формозмінення та температурної залежності коефіцієнтів теплопереносу. Розв'язання задачі у такій складній постановці одержано вперше автором дисертації при використанні сіткової моделі та ЕОМ.

В цілому, одержані в роботі наукові розробки дозволяють закрити ряд прогалів в можливостях комплексного дослідження теплових процесів металургійного виробництва.

Практична цінність та реалізація результатів роботи.

З метою удосконалення технології металургійного виробництва розроблені автором дисертації математичні моделі розв'язання задач тепломасообміну неодноразово використовувались ним для дос-

лідження температурного поля об'єктів, що проходять різні стадії технології металургійного виробництва. Зокрема, були розв'язані такі задачі, що мають практичне застосування: плавлення тіл різної форми при сталому значенні теплового потоку на межі розділення фаз, а також при його залежності від часу: затвердіння плоских зливок при граничних умовах I, II, та III-го роду; затвердіння циліндричних зливок; нагрів плоских та циліндричних зливок при наявності рідкої серцевини; аналіз температурних змін в металі, що деформується на обтискному та товстолістовому станах; вивчення температурного поля порожнистої циліндричної заготовки при її прокатці; дослідження температурного поля частин металургійного обладнання, що працюють в умовах високоінтенсивних теплових впливів.

Розв'язання задачі теплопровідності з врахуванням істотної нелінійності граничних умов.

Одержані теоретичні результати неодноразово застосувались автором для якісного та кількісного аналізів явищ тепломасообміну, що супроводжують затвердіння та нагрів металу під прокатку, а також при наступній обробці його тиском. Такий комплексний аналіз, проведений на ряді підприємств (Дніпровський металургійний комбінат ім. Держинського, Дніпропетровський металургійний комбінат ім. Петровського, Баглійський завод котельно-допоміжного обладнання та трубопроводів, Сумгаїтський трубопрокатний завод), дав можливість виявити резерви ентальпії сталених зливок або виробів, розробити нові технологічні інструкції та скоротити тривалість нагріву на 10-15 хвилин, що підтверджується рядом актів упровадження у виробництво.

Результати дисертації можуть бути використані теплотехнічними лабораторіями підприємств, а також проектними та науководослідними інститутами для розробки ресурсозберігаючих техно-

логій.

Окрім того, ці результати використовувались і можуть бути використані надалі у навчальному процесі, оскільки автор опублікував по матеріалах дисертації 3 книги [1-3], дві з яких є навчальними посібниками для студентів металургійних вузів [1, 2]. Слід визначити, що книга [2] має визнаку срібної медалі ВДНГ СРСР.

Подальший розвиток методів досліджень, викладених у дисертації, є можливим у різних напрямках, зокрема для вивчення нагріву металу при його садженні, яке змінює свою масу з часом, що і знайшло відображення в останніх роботах автора [47-49].

Особистий внесок у наукову розробку

Дисертація являється самостійною працею автора, яка базується на опублікованих раніше його результатах досліджень. На різних етапах цих досліджень автор користувався консультаціями видних вчених (Б. Я. Любова, П. І. Полухіна, Н. Ю. Тайця, М. А. Тилкіна). В результаті, у співавторстві з ними був опублікований ряд наукових праць. Зміст дисертації являється подальшим розвитком положень, викладених у цих публікаціях, в значній мірі містить у собі нові дослідження автора і ні в якому випадку не уражає авторські інтереси консультантів.

В інших опублікованих спільних працях, а також при проведенні промислових досліджень автор завжди являвся керівником і залучав як співавторів тільки осіб, які виконували окремі технічні завдання.

Апробація роботи. Результати роботи були заслухані та обговорені на науково-технічних конференціях, семінарах та нарадах: Республіканська конференція вчених-металургів, Дніпропетровськ, 1969; Всесоюзна конференція по термообробці, Дніпропетровськ, 1971; Всесоюзна наукова нарада по тепловим напруженням в еле-

ментах конструкцій, Канів, 1972; Всесоюзна конференція "Теплофізика технологічних процесів", Тольятті, 1972; Республіканська конференція "Підвищення продуктивності та економічності печей для нагріву металу", Дніпропетровськ, 1973; Республіканська конференція "Теплові розрахунки в обробці металів тиском", Краматорськ, 1975; Обласний семінар по теорії тепломасообміну, Дніпропетровськ, 1968-1995; Вчена рада Московського інституту сталі та сплавів, Москва, 1976; Міжнародна конференція з питань металургії, Каїр, 1978, Арабська Республіка Єгипет; Всесоюзна конференція "Питання удосконалення теплової роботи та конструкцій металургійних печей", Дніпропетровськ, 1981; Всесоюзна конференція "Теплофізика технологічних процесів", Ташкент, 1984; Республіканська науково-технічна конференція "Теорія та практика теплової роботи металургійних печей", Дніпропетровськ, 1988; Республіканська конференція "Підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів у чорній металургії", Дніпропетровськ, 1989; Всесоюзний семінар "Прогресивна технологія та устаткування для нагріву заготовок під ковку, штамповку та термообробку", Москва, 1990; Спільний науковий семінар секції металургійних печей НТТ металургів України, кафедр промислової теплоенергетики та теплотехніки і екології металургійних печей ДМетАУ, Дніпропетровськ, 1995; Об'єднаний науково-технічний семінар Дніпродзержинського державного технічного університету, Дніпродзержинськ, 1995.

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано в 49 друкованих працях, у тім числі в 3 книгах.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота містить в собі Вступ, 6 Глав та Висновки, викладена на 240 сторінках друкарського тексту, ілюстрована 134 рисунками, включає в себе бібліографію із 329 найменувань та Додаток.

Основні положення, що виносяться на захист.

Нові розв'язання та результати досліджень актуальних задач теплопровідності технологічного ланцюга металургійного виробництва (плавлення, затвердіння, нагрів зливків у колодязях при наявності рідкої серцевини, обробка металів тиском, нагрів тіл при істотній нелінійності граничних умов), знайдених на основі розробленої автором математичної моделі, що включає в себе процедуру редукації та параметричного збурення (метод РПЗ);

нові результати досліджень (за допомогою сіткової моделі та з реалізацією її на ЕОМ) температурного поля порожнистої циліндричної заготовки в процесі її прокатки з врахуванням двовимірності та гетерогенності поля, переміщення у просторі геометричних границь об'єкта, внутрішньої течії металу, дисипації енергії пластичного формозмінювання, а також температурної залежності коефіцієнтів теплопереносу;

нові технологічні рішення нагріву зливків та виробів, розроблені на базі проведених досліджень.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. КОРОТКИЙ ОГЛЯД ТА ВИБІР МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Технологічний ланцюг металургійного виробництва включає в себе ряд складних, з теплофізичної точки зору, процесів переробки: плавлення, затвердіння, нагрів, обробку металу тиском та ін. Технічно грамотне здійснення згаданих процесів неможливе без правильного врахування теплових явищ, що відбуваються при цьому.

Вивченню цього питання присвятив свої роботи ряд вчених: Семикін І.Д., Тайц Н. Ю., Гольдфарб Е. М., Губинський В. Й., Глінков М. О., Любов Б. Я., Коздоба Л.О., Никитенко М.І., По-

стольник Ю.С., Самойлович Ю.А. та багато інших.

З удосконаленням та інтенсифікацією металургійного виробництва зростає роль комплексного вивчення теплових явищ, що супроводжують це виробництво і, зокрема, роль математичних методів із застосуванням теорії тепломасообміну. За термінологією цієї теорії мова йде про нелінійні задачі теплопровідності, коли в об'єкті, що вивчається, відбуваються фазові перетворення, внутрішнє вимушене конвективне масоперенесення, дисипація механічної енергії формозмінювання та ін.

Інформаційні дослідження, проведені в цій роботі, показали, що вже розроблена велика кількість різноманітних методів розв'язування нелінійних задач теплопровідності (як аналітичних, так і чисельних). Але ці методи мають або занадто загальний, або занадто частинний характер, що утруднює (або робить неможливим) їх використання при комплексному дослідженні задач теплопровідності металургійної переробки.

Вибираючи метод дослідження згаданих задач, автор дисертації керувався слідуючими міркуваннями:

1) якщо можливо ухилитися від внесення в задачу теплопровідності ускладнюючих подробиць (наприклад, залежність коефіцієнтів теплопереносу від температури та ін.), то є доцільним використання аналітичних методів;

2) у випадку ускладнення задач теплопровідності (крім нелінійності, зумовленої переміщенням границь розподілу фаз) нелінійністю, визваною залежністю граничних умов та коефіцієнтів теплопереносу від температури, має рацію застосування чисельних методів з їх реалізацією на ЕОМ.

Як перший, так і другий методи були використані у відповідних розділах дисертації.

Як аналітичний, запропоновано метод, котрий включає в себе

два етапи: редукцію первинної системи диференціальних рівнянь і наступне застосування методу параметричного збурення (метод РПЗ).

Зокрема, якщо закон переміщення границі розділення фаз являється невідомою функцією і визначається кінетикою процесу (плавлення та затвердіння об'єктів), процедура редукції здійснюється шляхом зображення функції температурного поля об'єкта, що вивчається, рядом Тейлора і введенням його в граничні умови, що приводить до створення системи нелінійних звичайних диференціальних рівнянь (гл. 2 та 3).

Цей же спосіб може бути застосований і тоді, коли мають місце вимушене переміщення границі об'єкта (обробка металів тиском (гл. 4)) або істотна нелінійність граничних умов, а також залежність коефіцієнта тепловіддачі від часу (гл. 6), хоча до більш простих залежностей приводить редукція за допомогою інтегрального перетворення Лапласа-Карсона.

Наступне застосування методу збурення веде до створення послідовності лінійних звичайних диференціальних рівнянь, розв'язання яких можна знайти звичайними методами математичної фізики і, що важливо, до цих розв'язань можливе застосування принципу суперпозиції, а це дає можливість досліджувати дво- та тривимірні температурні поля.

Особливості застосування аналітичного та чисельного методів розглянуто в наступних главах дисертації, коли процеси теплопереносу аналізуються на конкретних етапах металургійної переробки.

2. ПРОЦЕСИ ПЛАВЛЕННЯ ТІЛ

Отриманню литих виробів та зливків, що широко використовуються в промисловості, завжди передує процес плавлення металевих шихти. Ця обставина, а також необхідність отримання вірогід-

ної інформації про особливості протікання теплових процесів на різних стадіях металургійної переробки з метою її ефективного управління, потребують розробки алгоритмів, що досить повно і точно описують динаміку переходу матеріалу із твердого в рідкий стан.

Метод редукції та параметричного збурення (метод РПЗ) є тим математичним інструментом, що дає можливість отримання таких алгоритмів. В цій главі за допомогою цього методу розв'язана задача теплопровідності для слідуючих випадків:

- 1) питомий тепловий потік, який проходить через поверхню тіла, що плавиться, має сталі значення (симетрична задача);
- 2) цей потік залежить від часу (симетрична задача);
- 3) плавлення пластини при асиметричних граничних умовах.

Розглянемо особливості методу РПЗ на прикладі плавлення тіл довільної канонічної форми.

Припустимо, що плавлення тіла здійснюється при безперервному усуванні рідкого розплаву при сталій температурі плавлення T_f , а також при сталих значеннях температури тепловіддавального середовища та коефіцієнта тепловіддачі. Тоді процес буде протікати при сталому значенні питомого теплового потоку q , який проходить через рухому поверхню твердого залишку тіла, що проплавляється.

Вважаючи розподіл температури по перерізу тіла на початку плавлення відомим, сформулюємо задачу математично. Диференціальне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + \frac{2\nu+1}{x} \cdot \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right), \quad 0 \leq x \leq \rho(t); \quad (2.1)$$

де

$T(x,t)$ - функція температури тіла, що плавиться; x - координата

та; t - час; a - коефіцієнт температуропровідності; ν - фактор форми тіла, що має значення: $-1/2$ (пластина), 0 (циліндр), $1/2$ (куля); $\rho(t)$ - половина товщини або радіус твердого залишку.

Граничні умови

$$\left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad T(\rho(t)) = T_f \quad (2.2)$$

Умова теплового балансу

$$\lambda \left. \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\rho(t)} = q + Q_0 \gamma \frac{d\rho(t)}{dt}, \quad (2.3)$$

Початкова умова

$$T(x,0) = f(x), \quad (2.4)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності; Q_0 - питома теплота плавлення; γ - густина твердого залишку; функція $f(x)$ припускається розкладною в ряд по парним ступеням x .

Зформульована таким чином задача теплопровідності є нелінійною у зв'язку з розривом на границі фазового перетворення. Ця обставина робить неможливим застосування класичних методів розв'язування лінійних задач теплопровідності і примушує звертатися до спеціальних способів розв'язування нелінійних задач. Як такий, тут пропонується метод РПЗ.

У відповідності до процедури цього методу, на першому етапі початкова система рівнянь (2.1) - (2.4) піддається редукції, що практично означає її перетворення в систему звичайних нелінійних диференціальних рівнянь, що адекватно детермінують умови поставленої задачі. С цією метою будемо шукати загальне розв'язання рівняння (2.1) у вигляді слідуючого ряду*

$$T(x,t) = B(t) + x^2 B_1'(t) + x^4 B_2'(t) + \dots \quad (2.5)$$

* Карслоу Г. и Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 420 с.

Підставляючи (2.5) у рівняння (2.1) та порівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях x , знаходимо

$$T(x, t) = B(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^{2n}}{(2n)!!(2\nu + 2n)!! a^n} \cdot \frac{d^n}{dt^n} B(t), \quad (2.6)$$

де $B(t)$ - функція температури центру тіла, що плавиться. Тут розглядаємо симетричну задачу, тому функція $T(x, t)$ повинна бути парною. У випадку несиметричного температурного поля у виразі (2.5) треба ввести також члени, що мають непарні ступені x .

Задовольняючи (2.6) граничній умові (2.2), а також умові теплового балансу (2.3), отримуємо наступну систему нелінійних звичайних диференціальних рівнянь:

$$B(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\rho(t))^{2n}}{(2n)!!(2\nu + 2n)!! a^n} \cdot \frac{d^n}{dt^n} B(t) = T_1, \quad (2.7)$$

$$-Q_0 \gamma \frac{d\rho}{dt} = q - \lambda \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n(\rho(t))^{2n}}{(2n)!!(2\nu + 2n)!! a^n} \cdot \frac{d^n}{dt^n} B(t). \quad (2.8)$$

Ці рівняння необхідно розв'язувати при початкових умовах, що визначаються конкретним видом функції початкового розподілу температури по перерізу проплавлюваного тіла. Зокрема, коли цей розподіл можна апроксимувати параболою четвертого порядку, тобто

$$T(x, 0) = A_0 + A_1 x^2 + A_2 x^4, \quad (2.9)$$

то маємо

$$B(0) = A_0; \quad \left. \frac{d}{dt} B(t) \right|_{t=0} = (2!!)(2\nu + 2)!! a A_1; \quad (2.10)$$

$$\left. \frac{d^2}{dt^2} B(t) \right|_{t=0} = (4!!)(2\nu + 4)!! a^2 A_2; \quad \left. \frac{d^n}{dt^n} B(t) \right|_{t=0, n>2} = 0. \quad (2.11)$$

Використовуючи безрозмірні величини

$$X = \frac{R - \rho}{R}; \quad Fo = \frac{at}{R^2}; \quad \delta(Fo) = \frac{2\lambda}{qR} B(t); \quad N = \frac{2Q_0\lambda}{cqR},$$

$$v(X, Fo) = T(x, t) \frac{2\lambda}{qR},$$

де $2R$ - початкова товщина (або діаметр) тіла, що плавиться; c - питома теплоємність, запишемо нормалізовану систему нелінійних звичайних диференціальних рівнянь

$$\delta(Fo) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1-X)^{2n}}{(2n)!!(2\nu+2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta(Fo) = v_1, \quad (2.12)$$

$$N \frac{dX}{dFo} = 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(1-X)^{2n-1}}{(2n-2)!!(2\nu+2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta(Fo). \quad (2.13)$$

На цьому закінчується процес редукції початкової задачі теплопровідності (1-й етап методу РПЗ). На другому етапі необхідно визначити функції $\delta(Fo)$ та $X(Fo)$, що дасть повну інформацію про закони руху межі фазового перетворення та розподілу температури усереднені твердого залишку. З цією метою тут залучається метод параметричного збурення, згідно з процедурою якого пошукувані функції $\delta(Fo)$ та $X(Fo)$ зобразимо у вигляді таких розкладань у ряд по ступеням умовного параметра ξ :

$$\delta(Fo) = (Fo) + \xi \delta_1(Fo) + \xi^2 \delta_2(Fo) + \dots, \quad (2.14)$$

$$X(Fo) = X_0(Fo) + \xi X_1(Fo) + \xi^2 X_2(Fo) + \dots, \quad (2.15)$$

де $\delta_1, \delta_2, \dots; X_1, X_2, \dots$ - послідовності додатків до породних розв'язань δ_0 та X_0 функцій $\delta(Fo)$ та $X(Fo)$.

Одночасно з цим у виразі (2.12) та правій частині виразу (2.13) замість X запишемо ξX . Підставляючи після цього розкладання (2.14) та (2.15) у змінені таким чином співвідношення (2.12) і (2.13) та порівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях параметра ξ , знаходимо послідовність лінійних диференціальних рівнянь, що визначають функції $\delta(Fo)$ та $X(Fo)$.

Нульове наближення (породна система диференціальних рівнянь)

$$\delta_0(Fo) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)!!(2\nu + 2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta_0(Fo) = \nu_1, \quad (2.16)$$

$$N \frac{dX_0(Fo)}{dFo} = 2 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-2)!!(2\nu + 2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta_0(Fo). \quad (2.17)$$

Ця система рівнянь визначає:

1) функцію температури центру тіла $\delta(Fo)$ при відсутності збурення (під збуренням тут треба розуміти товщину проплавленого шару);

2) товщину проплавленого шару $X(Fo)$ при умові пошуку функції $\delta(Fo)$ із незбуреної задачі.

Перший додаток

$$\delta_1(Fo) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n)!!(2\nu + 2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta_1(Fo) = \varphi_1(Fo), \quad (2.18)$$

$$N \frac{dX_1(Fo)}{dFo} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-2)!!(2\nu + 2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta_1(Fo) + \psi_1(Fo), \quad (2.19)$$

де

$$\varphi_1(Fo) = X_0(Fo) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-2)!!(2\nu + 2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta_0(Fo), \quad (2.20)$$

$$\psi_1(Fo) = X_0(Fo) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n-1}{(2n-2)!!(2\nu + 2n)!!} \cdot \frac{d^n}{dFo^n} \delta_0(Fo). \quad (2.21)$$

Аналогічно утворюються наступні додатки до породного розв'язання, хоча, як показано в дисертації, задовільну для практики точність забезпечують нульове або принаймні перше наближення.

Внаслідок застосування методу редукції та параметричного збурення початкова нелінійна задача теплопровідності трансформується в послідовність звичайних лінійних диференціальних рівнянь, роз-

в'язання яких можливе за допомогою тривіальних методів математичної фізики. З цією метою в роботі використовується метод інтегральних перетворень Лапласа-Карсона.

Розрахунки показують, що для практики досить нульового або першого наближення.

У цій главі також розглянуто більш складну задачу пропалвлення пластини при несиметричних граничних умовах, коли одна її поверхня піддається плавлячому тепловому впливу, а друга віддає тепло шляхом випромінювання та конвекції у навколишнє середовище, що має температуру T_c при сумарному коефіцієнті тепловіддачі α . Сутність процедури методу РПЗ у даному випадку не змінюється, але в загальному розв'язанні диференціального рівняння (2.1) з'являються члени, що мають x у непарному ступені, тобто замість виразу (2.5) має бути наступний:

$$T(x, t) = (B(t) + x^2 B'_1(t) + x^4 B'_2(t) + \dots) + (xC(t) + x^3 C'_1(t) + x^5 C'_2(t) + \dots), \quad (2.22)$$

де $B(t)$ та $C(t)$ - відповідно, температура та питомий тепловий потік на поверхні $x=0$ (з боку охолоджуючого ефекту).

На прикладі дослідження динаміки плавлення тіл показані особливості застосування методу редукції та параметричного збурення (РПЗ) до розв'язування нелінійних задач теплопровідності з рухомими границями, коли закон руху границі розділення фаз невідомий і зумовлений кінетикою процесу. Отримані аналітичні залежності, що описують розподіл температури по перерізу твердого залишку та закон змінювання його товщини, зображені в узагальненому вигляді для довільної канонічної форми тіла, звідки нескладно знайти відповідні вирази, що відносяться до конкретних форм тіла.

Ці аналітичні залежності, можуть бути використані для розрахунків плавлення чистих металів, а також у

падках, наприклад, для плавлення сталюного брухту у залізовуглецевому розплаві, що має місце на практиці при одержанні сталюних зливків та литих виробів. Цей же підхід можна використати для аналізу інших тепломасообмінних процесів (сублімації, абляції речовини та ін.). В той же час методом, аналогічним викладеному у цій главі, можна розв'язувати більш складні задачі (наприклад, про затвердіння зливків, або про їх нагрів при неявиності незатверділої серцевини та ін.).

Отримані розрахункові дані задовільно збігаються із аналогічними результатами інших авторів, являючись у той же час більш загальними, бо більш повно враховують розподіл температури по перерізу тіла на початку плавлення та в процесі його протікання. Як правило, інші автори розглядають випадок, коли по перерізу тіла на початку плавлення температура розподіляється згідно з параболічним законом другого порядку. Цей випадок являється частинним по відношенню до вивчених у дисертації.

Знайдені в даній роботі аналітичні залежності, що визначають процес плавлення тіл, являють собою явні функції, а їх обчислення можливе без залучення складної і коштовної обчислювальної техніки, що є неминучим при використанні чисельних методів.

Були проведені розрахунки, що охоплюють широкий спектр різних варіантів процесів плавлення у чорній металургії. Результати цих розрахунків приведені в дисертації у вигляді номограм, використання яких дає інженеру-металургу або досліднику можливість швидкого аналізу динаміки плавлення тіл без створення нових складних математичних моделей або проведення трудомістких експериментів.

3. ПРОЦЕСИ ЗАТВЕРДІННЯ ЗЛИВКІВ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ТА НАСТУПНОМУ НАГРІВІ

Значна частина зливків, що прокатуються на обтискних станах,

надходить до нагрітих колодязів у гарячому стані (гаряча посадка). З метою раціонального використання ентальпії затвердіваючих (або затверділих) зливків на практиці прагнуть до максимально можливого скорочення часу від моменту розливки сталі до моменту завантаження зливків у нагрівні колодязі. Завдяки цій обставині зливки надходять до прокатного цеху маючи, як правило, високу середню температуру, іноді достатню для їх прокатки. Але істотна нерівномірність розподілу температури по перерізу зливків, а також звичайна в такому випадку наявність незатверділої середньої частини вимагають поміщення зливків у нагрівні колодязі з метою завершення процесу їх твердіння, вирівнювання температури по перерізу та доведення середньої температури до рівня, якого потребує технологія прокатки.

Таким чином, розв'язання питання про затвердіння зливка та його наступний нагрів у колодязі при наявності незатверділої серцевини являють собою одну із найважливіших і актуальних задач металургійної теплотехніки.

У цій главі, з метою подальшого розвитку математичних методів розв'язування нелінійних задач теплопровідності з рухомими границями розмежування фаз, процеси затвердіння плоских та циліндричних зливків та їх нагріву при наявності незатверділої серцевини вивчаються за допомогою методу РПЗ.

Використовуючи процедуру методу РПЗ, в роботі розглянуто затвердіння плоского зливка при граничних умовах I, II та III-го роду. В початковий момент часу між двома плоскопаралельними стінками, розташованими на відстані $2R$ одна від іншої, знаходиться рідка фаза, що має температуру T_0 . В результаті тепловідводу через стінки розпочинається поступове затвердіння рідкої фази. Як приклад, тут розглядається випадок, коли температура ^{поверхні} зливка приймається відомою для всіх стадій теплової обробки злив-

ка, які він проходить від моменту закінчення заливки рідкого металу у виливницю до початку обробки тиском (граничні умови I - го роду). Математично задача формулюється таким чином

Диференціальні рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq \beta(t), \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2}, \quad \beta(t) < x \leq R. \quad (3.2)$$

Початкові

$$T_1(x,0)=T_{\kappa}; \quad T_2(x,0)=T_{\kappa}; \quad \beta(0)=0 \quad (3.3)$$

та граничні умови

$$T_1(x,t)|_{x=0} = T_{\Pi}(t); \quad T_1(x,t)|_{x=\beta(t)} = T_{\kappa}; \quad (3.4)$$

$$T_2(x,t)|_{x=\beta(t)} = T_{\kappa}; \quad \left. \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} \right|_{x=R} = 0, \quad (3.5)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\beta(t)} - \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} \right|_{x=\beta(t)} = Q_0 \rho \frac{d\beta(t)}{dt}, \quad (3.6)$$

де T_{κ} - температура затвердіння металу; Q_0 - питома теплота затвердіння; ρ - густина; $T_{\Pi}(t)$ - температура поверхні зливка; $\beta(t)$ - товщина затверділого шару; a_1 та a_2 - коефіцієнти температуропровідності; λ_1 та λ_2 - коефіцієнти теплопровідності.

Індекс 1 відноситься до твердої, індекс 2 - до рідкої фази.

Розв'язання поставленої задачі затвердіння знаходимо методом РПЗ. В цьому разі редукція початкових рівнянь приводить до утворення системи трьох нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, що визначають три функції:

- 1) переміщення фронту розмежування фаз;
- 2) розподілу температури по перерізу твердої фази;
- 3) розподілу температури по перерізу рідкої фази.

В задачі плавлення редукція дає можливість утворити систему

двох таких рівнянь.

Подальше застосування методу параметричного збурення приводить до утворення послідовності лінійних звичайних диференціальних рівнянь, що дає можливість визначити послідовні наближення зазначених трьох функцій. Зокрема, для нульового наближення функції товщини затверділого шару маємо

$$l_0(F_0) = \frac{1}{N} \left(\nu_{\kappa} f_4(F_0) - \frac{f_{\lambda}}{f_a} (1 - \nu_{\kappa}) \Phi_3(F_0) - \int_0^{F_0} \nu_{\eta}(t) f_1(F_0 - t) dt \right). \quad (3.7)$$

Вираз (3.7) зображено у безрозмірному вигляді, причому

$$l(F_0) = \frac{\beta(F_0)}{R}; \quad N = \frac{Q_0}{c_1 T_3}; \quad \nu(X, F_0) = \frac{T(x, F_0)}{T_3}; \quad X = \frac{x}{R},$$

$f_{\lambda} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; \quad f_a = \frac{a_2}{a_1}; \quad F_0 = \frac{a_1 t}{R^2}; \quad c_1$ - питома теплоємність твердої фази;

$$f_4(F_0) = F_0 + \frac{1}{3} + 2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{(-1)^{\kappa} e^{-\pi^2 \kappa^2 F_0}}{\pi^2 \kappa^2};$$

$$\Phi_3(F_0) = 1 - 2 \sum_{\kappa=0}^{\infty} \frac{e^{-\pi^2 \left(\kappa + \frac{1}{2}\right)^2 F_0} f_a F_0}{\pi^2 \left(\kappa + \frac{1}{2}\right)^2}; \quad f_1(F_0) = 1 + 2 \sum_{\kappa=1}^{\infty} (-1)^{\kappa} e^{-\pi^2 \kappa^2 F_0}.$$

Порівняння результатів визначення динаміки затвердіння плоского зливка, знайдених іншими авторами (Адамс М. С., Семікін Й. Д., Гольдфарб Е. М., Любов Б. Я., Іванцов Г. П.) з отриманими тут даними в нульовому наближенні показує їх задовільну збіжність.

З іншої сторони, графічна інтерпретація послідовних наближень показує, що для практичних задач дослідження затвердівання плоского зливка достатню точність у більшості випадків зумовлює нульове наближення.

В дисертації за допомогою методу РПЗ були розглянуті також питання затвердіння та нагріву при наявності рідкої серцевини зливків циліндричної форми. Процедура використання методу РПЗ для розв'язування задач затвердіння об'єктів циліндричної форми принципіально не відрізняється від такої ж процедури для плоских зливків.

Адекватність знайдених результатів була перевірена шляхом порівняння їх з результатами чисельних досліджень (роботи Горбунова О. Д. та ін.).

Істотним результатом являється можливість визначити момент завершення затвердіння зливків у нагрівальних колодязях і, таким чином, не допустити їх видачу в прокат при наявності рідкої серцевини.

Були виконані розрахунки затвердіння зливків при охолодженні у виливниці та нагріві у нагрівальних колодязях. Показано, що теоретичні результати роботи являються засобом для вірного визначення (а в ряді випадків скорочення) тривалості нагріву зливків з незатверділою серцевиною. У розрахунковому випадку наші дані близькі до експериментальних даних інших авторів.

Теоретичні висновки цієї глави дисертації стали основою при розробці на деяких підприємствах нових технологічних інструкцій для енергозберігаючого нагріву металу у колодязях.

4. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ПРИ ОБРОБЦІ МЕТАЛУ ТИСКОМ НА ОБТИСКНИХ ТА ТОВСТОЛИСТОВИХ СТАНАХ

Збільшення продуктивності прокатних станів та ковальсько-штампувальних машин, а також поліпшення якості продукції, яка випускається, часто гальмується відсутністю достатньо надійної інформації про розподіл температури по обсягу металу, що деформується. Окрім цього, у ряді випадків залишаються неврахованими значні резерви виробництва, а управління технологічним про-

цесом позбавляється гнучкості. Зокрема, незнання характеру температурних змін в металі при обробці тиском визиває необхідність такого нагріву початкової заготовки, який би з запасом перекрив усі витрати теплоти, що мають місце на протязі технологічного процесу. Ця обставина може зумовити підвищену витрату палива (або електроенергії), надмірне окалиноутворювання, перегрів металу та ін. Окрім цього стає неможливим раціональне використання початкової ентальпії зливків.

У даній главі дисертації поставлена задача дослідити на основі застосування методу РПЗ температурне поле металу, що деформується при прокатці на обтискних та товстолистових станах.

При аналітичному дослідженні температурного поля металу, що прокатується на обтискних станах, можна прийняти припущення про те, що розкат є по висоті напівобмеженим тілом. Таке припущення базується на понятті про інерційний час, який в теорії нагріву являє собою час проникнення теплового імпульсу від поверхні тіла до його центру. Конкретні розрахунки показують, що у випадку прокатки на обтискних станах загальний час прокатки не перевищує інерційний час, віднесений до кінцевої товщини розкату.

Покажемо у загальних рисах методику визначення температурного поля розкату при проходженні його через зону деформації.

Зформулюємо поставлену задачу теплопровідності математично (градієнт температури розкату в подовжньому та поперечному напрямках нехтується внаслідок того, що розміри розкату у цих напрямках значно перевищують його товщину):

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} - v_x(x) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} + \frac{W}{c\rho}; \quad (4.1)$$

$$v_{\text{м}} t \leq x \leq \infty; \quad 0 \leq t \leq t_2; \quad (4.2)$$

$$T(x, t)|_{t=0} = f(x); \quad (4.3)$$

$$\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=v_m t} = q; \quad (4.4)$$

$$T(x, t)|_{t=\infty} \neq \infty; \quad \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=\infty} = 0; \quad (4.5)$$

де $T(x, t)$ - температурна функція; x - координата; t - час; a - коефіцієнт теплопровідності; $v_x(x)$ - швидкість внутрішнього масопереносу; c - питома теплоємність; λ - коефіцієнт теплопровідності; v_{xn} - швидкість переміщення поверхні; W - питома потужність теплового джерела; q - питомий тепловий потік; t_2 - час, на протязі якого даний поперечний переріз проходить через зону деформації. Функція $f(x)$ повинна визначатися в результаті розв'язання задачі теплопровідності для паузи, що передує даному пропуску.

Процедура методу РПЗ для розглядуваної задачі включає в себе наступні етапи:

1) упрощення рухомої системи координат, зв'язаної з нерухомою таким співвідношенням

$$y = x - v_{xn} t; \quad (4.6)$$

2) застосування інтегрального перетворення Лапласа-Карсона до задачі, вираженої в рухомій системі координат; в результаті одержується звичайне нелінійне диференціальне рівняння в області зображення;

3) використання методу параметричного збурення, що дає можливість утворити послідовність лінійних звичайних диференціальних рівнянь в області зображення при відповідних крайових умовах;

4) розв'язання цих рівнянь;

5) зворотне перетворення отриманих розв'язань.

В дисертації були знайдені аналітичні вирази, що описують тем-

пературне поле металу при його прокатці на обтискних станах, починаючи від моменту видачі із нагрівного колодязя до завершення процесу прокатки при граничних умовах II-го та III-го роду.

Для з'ясування якісної картини температурних змін в розкати була розрахована температура різних точок у різні моменти часу на протязі семи пропусків при прокатці сляба товщиною 120 мм із зливка, що мав поперечний переріз $740 \times 740 \text{ мм}^2$. Розрахункові дані показали, що температура всіх дослідних точок змінюється з часом згідно з деяким гармонічним законом. Максимальні значення температурних коливань мають місце на поверхні розкату. По мірі проникнення теплової хвилі углиб розкату амплітуда коливання температури зменшується.

З метою встановлення практичної застосовності отриманих теоретичних залежностей, що визначають температурне поле розкату, були проведені експериментальні дослідження температури металу в процесі прокатки слябів на блюмінзі 1150 Дніпровського металургійного комбінату ім. Дзержинського. Початкові розміри зливків $\frac{560 \times 1070}{615 \times 1125} \times 2100$ мм, маса 8,96 т, матеріал - Ст.3 сп. Порівняння експериментальних та теоретичних даних показує їх задовільну збіжність.

На ряді підприємств був проведений комплексний аналіз, який включав у себе вивчення затвердіння злиwkів, їх нагрів (у тому числі при наявності незатверділої серцевини), а також температурних змін на протязі прокатки. При цьому були виконані теоретичні та експериментальні дослідження, а також виробничі випробування, частиною яких був розгляд даних про якість готового прокату. На основі цього аналізу були розроблені нові технологічні інструкції, що дозволили скоротити тривалість нагріву злиwkів на

10-15 хвилин без погіршення якості готового прокату. Тривалість нагріву визначалась на основі запропонованого в дисертації математичного підходу до розв'язання задач теплопровідності з рухомими границями, що дало можливість встановити факт необгрунтованого подовження процесу нагріву металу, готового для прокатки (Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського стану 1050 та 1150; Дніпропетровський металургійний комбінат ім. Петровського - стан 1050; Сумгаїтський трубопрокатний завод - стан 850).

Такий аналіз дав позитивні результати тільки завдяки комплексному дослідженню технологічного ланцюга "затвердіння-охолодження-нагрів-прокатка" як єдиного цілого. Це дає право вважати, що проведення комплексних досліджень являється необхідним при розробці енергозберігаючих технологій у чорній (і не тільки) металургії. Необхідні для цього математичні моделі запропоновані у дисертації.

Окрім того, у цій главі були розглянуті дві методики розрахунку температурного поля розкату при прокатці товстих листів. В основу цих методик покладені міркування про інерційність температурного поля розкату, використані нами раніше для аналізу температурного поля металу при прокатці на обтискних станах. Обидва методи, умовно названі як постадійний (перший) та метод, що враховує інерційний період розкату (другий), базуються на функціях температурного поля, одержаних методом редукції та параметричного збурення.

Був виконаний розрахунок температурних змін в металі, що деформується при прокатці в чорновій групі клітей стану 1700 (Карагандинський металургійний комбінат).

Був проведений аналіз умов зовнішнього теплообміну при обробці металів тиском. В результаті запропонована нова методика

та складені номограми для визначення середньомасової температури при прокатці дрібносоротної сталі, що знайшло практичне застосування при розробці та упровадженні у виробництво нової технології прокатки кутових профілів в умовах Дніпровського металургійного комбінату ім. Дзержинського.

Доведено, що при прокатці на обтискних та товстолистових станах теплообміном охоплена незначна приконтатна частина висоти розкату, у якій відбуваються основні температурні змінювання. Товщина цієї частини залежить від конкретних умов транспортування зливків (для обтискних станів вона приблизно складає 30-50 мм) та заготовок до валків, а також від технології прокатки, а її середня температура істотно відрізняється від середньої температури всього розкату (іноді нижче на 100-200 °С). Цю обставину необхідно враховувати при розробці технології прокатки, а також при визначенні міцностних та зносостійких характеристик прокатного інструменту.

5. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ПРИ ПРОКАТЦІ ПОРОЖНИСТИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК

В попередній главі були проведені розв'язання задачі теплопровідності, які дозволяють детермінувати температурне поле металу при прокатці слябів та товстих листів. Ці розв'язання є достатньо простими для розрахунків і мають не тільки інформативне, але і методичне значення, оскільки процедура постановки задачі та її розв'язання може бути розповсюджена на більш складні випадки тепломасообміну. Використовуючи викладенню згаданій главі підхід до постановки задачі теплопровідності для об'єкта, що деформується, розв'язана значно складніша проблема. Ця проблема стосується вивчення температурного поля металу при прокатці порожнистих циліндричних заготовок.

Розглянемо ситуацію, коли потрібно визначити температурне

поле порожнистого циліндра (гільзи) обмеженої довжини, що піддається пластичній деформації. Початкові розміри заготовки: внутрішній радіус R_0 , зовнішній R_a , довжина l_a . В результаті розклатки гільза отримує остаточні розміри: внутрішній радіус R_0 , зовнішній R_a , довжина l_0 . При цьому відбувається зменшення зовнішнього радіусу гільзи на величину $R_a - R_0$, а також подовження заготовки, що дорівнює $l_0 - l_a$. Обробка тиском відбувається на оправці, що має радіус R_0 (вважаємо, що внутрішній радіус заготовки та радіус оправки на протязі прокатки не змінюються). Такий процес відбувається за допомогою привідних валків, що мають кут нахилу β до подовжньої осі прокатки, і є характерним при виробництві значної кількості труб, порожнистих залізничних осей та інших циліндричних виробів, що мають внутрішній отвір. Як об'єкт дослідження тут вибрана прокатка порожнистої гільзи чорнової залізничної осі у трьохвалковому стані - елонгаторі.

Математично задача формулюється слідуячим способом:

Диференціальне рівняння теплопровідності

$$C_v^{(\gamma)} \frac{\partial T^{(\gamma)}}{\partial t} = \frac{1}{x^{(\gamma)}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(x^{(\gamma)} \lambda^{(\gamma)} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda^{(\gamma)} \frac{\partial T^{(\gamma)}}{\partial y} \right) - \eta^{(\gamma)} \cdot Q(x, y, t) \cdot C_v^{(t)} \quad (5.1)$$

де $T^{(\gamma)} = T^{(\gamma)}(x, y, t)$ - температурні функції, відповідно, для металу, що деформується ($\gamma=1$) та оправки ($\gamma=2$); v - фактор форми, що дорівнює нулю для плоского та одиниці для циліндричного тіла; $\eta^{(1)}=1$; $\eta^{(2)}=0$; $C_v^{(\gamma)}$ - об'ємна теплоємність відповідного тіла; $0 \leq x \leq R_a$; $-\infty \leq y \leq +\infty$; $0 \leq t \leq t_a$; t_a - тривалість розклатки однієї гільзи; $\lambda^{(\gamma)}$ - коефіцієнт теплопровідності,

$$Q(x, y, t) = v^{(x)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} + v^{(y)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial y} - \frac{W(x, y, t)}{C_v^{(t)}}, \quad (5.2)$$

$v^{(x)}$ та $v^{(y)}$ - компоненти швидкості течіння металу по осям x та y ;
 $W(x, y, t)$ - потужність тепловиділення в зоні деформації.

Початкові умови:

$$T^{(1)}(x, y, 0) = f^{(1)}(x, y) - \text{відомі функції.} \quad (5.3)$$

Граничні умови:

Для внутрішньої поверхні гільзи

$$T^{(1)}(R_0, y, t) = T^{(2)}(R_0, y, t), \quad 0 \leq y \leq l(t); \quad (5.4)$$

$$\lambda^{(1)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \Big|_{x=R_0} = \lambda^{(2)} \frac{\partial T^{(2)}}{\partial x} \Big|_{x=R_0}, \quad 0 \leq y \leq l(t). \quad (5.5)$$

По подовжній осі оправки

$$\frac{\partial T^{(2)}}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad T^{(2)} \Big|_{x=0} \neq \infty; \quad -\infty \leq y \leq +\infty. \quad (5.6)$$

$$T^{(2)} \Big|_{y=\pm\infty} \neq \infty; \quad \frac{\partial T^{(2)}}{\partial y} \Big|_{y=\pm\infty} = 0; \quad 0 \leq x \leq R_0; \quad (5.7)$$

$$-\lambda^{(2)} \frac{\partial T^{(2)}}{\partial x} \Big|_{x=R_0} = \alpha_a \left(T^{(2)} \Big|_{x=R_0} - T_a \right);$$

$$-\infty \leq y \leq 0; \quad l(t) \leq y \leq +\infty. \quad (5.8)$$

На зовнішній поверхні недеформованої та деформованої частин гільзи, а також у зоні деформації

$$\lambda^{(1)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial x} \Big|_{x=R(y,t)} = \alpha(y, t) \left(T_{oc}(y, t) - T^{(1)} \Big|_{x=R(y,t)} \right), \quad 0 \leq y \leq l(t), \quad (5.9)$$

де

$\alpha(y, t)$ - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні гільзи у навколишнє середовище; $T_{oc}(y, t)$ - температура середовища, що оточує поверхню гільзи; $R(y, t)$ та $l(t)$ - відповідно радіус зовнішньої поверхні та довжина гільзи в поточний момент прокатки; α_a -

коєфіцієнт тепловіддачі поверхні розкату в навколишню атмосферу; T_a - температура навколишньої атмосфери.

На торцьових ділянках гільзи

$$\lambda^{(t)} \frac{\partial T^{(t)}}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_a \left(T_a - T^{(t)} \Big|_{y=0} \right), \quad R_0 \leq x \leq R_a; \quad (5.10)$$

$$\lambda^{(t)} \frac{\partial T^{(t)}}{\partial y} \Big|_{y=l(t)} = \alpha_a \left(T_a - T^{(t)} \Big|_{y=l(t)} \right). \quad (5.11)$$

Умови внутрішнього та зовнішнього теплообміну у зформульованій вище задачі змінюються по координаті y та з часом внаслідок переміщення зони деформації вздовж подовжньої осі гільзи. Для врахування впливу цієї обставини на характер зміни зазначених умов тут вводиться допоміжна кусково-постійна функція $\delta(y, t)$. З її допомогою одержано математичний вираз функцій коєфіцієнта тепловіддачі $\alpha(y, t)$, температури навколишнього середовища $T_{oc}(y, t)$, радіуса зовнішньої поверхні гільзи $R(y, t)$, компонентів швидкості течіння металу в зоні деформації $v^{xj}(x, y, t)$ та $v^{yj}(x, y, t)$, а також потужності тепловиділення в металі гільзи $W(x, y, t)$.

Подана виразами (5.1)-(5.11) задача теплопровідності враховує залежність теплофізичних властивостей від температури, гетерогенність досліджуваної системи, вимушений конвективний масоперенос усередині та зміну форми металу, що деформується, а також тепловиділення в результаті дисипації енергії пластичного формозмінювання. Розв'язання цієї задачі в такій складній постановці доцільно виконати не аналітичним, а чисельним методом, що і зроблено в дисертації скінченно-різницеvim методом при залученні ЕОМ.

При скінченно-різницеvій апроксимації задачі неперервно визначеним функціям $T^{(r)}(x, y, t)$ поставим у відповідність дискретні функції

$$T_{ij}^{(\gamma)} = T^{(\gamma)}(x_i, y_j, t_{\kappa}) \text{ и } \hat{T}_{ij}^{(\gamma)} = \hat{T}^{(\gamma)}(x_i, y_j, t_{\kappa+1}),$$

визначені у фіксовані моменти часу $t_{\kappa} = \kappa \Delta t$, де Δt - сітковий крок відносно часу, а $\kappa = 1, 2, 3$ - номер часового шару.

Введемо в області просторових координат

$$0 \leq x \leq R_a \text{ та } 0 \leq y \leq l_a + 2 \cdot 10R$$

нерівномірну прямокутну сітку x_i та y_j , у якій $i = \overline{1, M3}$ та $j = \overline{1, N5}$, де $M3 = M_x + 1$, $N5 = N_y + 1$, M_x та N_y - числа розбивки складного тіла (оправка та метал) по осям x та y .

Сітковий аналог диференціального рівняння (5.1) має вигляд

$$C_{v_{ij}}^{(\gamma)} \frac{\hat{T}_{ij}^{(\gamma)} - T_{ij}^{(\gamma)}}{\Delta t} = A_{x_i}(\hat{T}^{(\gamma)}) + A_{y_j}(\hat{T}^{(\gamma)}) - \eta^{(\gamma)} Q_{ij} \cdot C_{v_{ij}}^{(\gamma)} \quad (5.12)$$

де $i = \overline{2, M3-1}$; $j = \overline{2, N5-1}$; $\gamma = 1; 2$;

$$A_{x_i}(\hat{T}^{(\gamma)}) = \frac{1}{x_i^{\nu} \bar{h}_i} \left(x_{i+\frac{1}{2}}^{\nu} \hat{\lambda}_{i+\frac{1}{2},j}^{(\gamma)} \frac{\hat{T}_{i+1,j}^{(\gamma)} - \hat{T}_{ij}^{(\gamma)}}{h_i} - x_{i-\frac{1}{2}}^{\nu} \hat{\lambda}_{i-\frac{1}{2},j}^{(\gamma)} \frac{\hat{T}_{ij}^{(\gamma)} - \hat{T}_{i-1,j}^{(\gamma)}}{h_{i-1}} \right);$$

$$A_{y_j}(\hat{T}^{(\gamma)}) = \frac{1}{\bar{h}_j} \left(\hat{\lambda}_{i,j+\frac{1}{2}}^{(\gamma)} \frac{\hat{T}_{i,j+1}^{(\gamma)} - \hat{T}_{ij}^{(\gamma)}}{h_j} - \hat{\lambda}_{i,j-\frac{1}{2}}^{(\gamma)} \frac{\hat{T}_{ij}^{(\gamma)} - \hat{T}_{i,j-1}^{(\gamma)}}{h_{j-1}} \right)$$

скінчено-різницеві оператори по осям x та y відповідно;

$$\bar{h}_i = (h_i + h_{i-1}) / 2; \quad \bar{h}_j = (h_j + h_{j-1}) / 2;$$

$$h_i = x_{i+1} - x_i; \quad h_j = y_{j+1} - y_j;$$

$$x_{i+\frac{1}{2}} = (x_i + x_{i+1}) / 2; \quad x_{i-\frac{1}{2}} = (x_i + x_{i-1}) / 2;$$

$$\lambda_{i+\frac{1}{2},j} = (\lambda(T_{i,j}) + \lambda(T_{i+1,j})) / 2; \quad \lambda_{i-\frac{1}{2},j} = (\lambda(T_{i,j}) + \lambda(T_{i-1,j})) / 2;$$

$$Q_{ij} = \nu_{ij}^{(x)} \frac{\hat{T}_{i+1}^{(t)} - \hat{T}_{i-1}^{(t)}}{2h_i} + \nu_{ij}^{(y)} \frac{\hat{T}_{i,j+1}^{(t)} - \hat{T}_{i,j-1}^{(t)}}{2h_j} - \hat{W}_{i,j}. \quad (5.13)$$

Аналогічно зображається сіткова апроксимація крайових умов.

Рівняння (5.12) разом з крайовими умовами розв'язувалась за допомогою економічної локально-одновимірної абсолютно стійкої неявної скінченно-різницевої схеми.

По даному алгоритму була складена програма та здійснена на мові ФОРТРАН в ОС ЕС ЕОМ.

Були виконані розрахунки для процесу прокатки порожнистої гільзи чорнової залізничної осі на трьохвалковому стані - елонгаторі на оправці.

В результаті розрахунків одержані числові значення, що визначають розподіл температури по поперечному перерізу та довжині гільзи і оправки на протязі прокатки. Було встановлено, що торцьові ділянки гільзи мають після прокатки істотно нижчу температуру ніж основна її частина. Цей факт достатньо очевидний з якісної точки зору без використання складного математичного апарату. Але якраз застосування останнього дає можливість кількісно врахувати заохолодження торців при розробці режимів нагріву первинних заготовок та наступної прокатки. При цьому необхідно взяти до уваги, що значний перепад температури по об'єму гільзи сприяє невиконанню її заданого профілю та погіршенню якості поверхні прокату. Ця обставина вимагає прийняття спеціальних заходів по оптимізації температурного поля порожнистої гільзи при прокатці. Можливими шляхами оптимізації можуть бути змінення форми торцьових частин або установка проміжного підогріву, що компенсує нерівномірність температурного розподілу в кінці прокатки.

6. ДЕЯКІ ЗАДАЧІ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПРИ ЗМІННИХ КОЕФІЦІЄНТАХ ПЕРЕНОСУ ТА НЕЛІНІЙНИХ ГРАНИЧНИХ УМОВАХ, СТОСОВНО ДО УМОВ РОБОТИ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

В процесі експлуатації деталі металургійного обладнання, що працюють в умовах високих температур, мають дуже складне температурне поле, що залежить у кожному конкретному випадку від багатьох технологічних факторів. Дослідження теплового стану зазначених деталей має велике практичне значення оскільки з ним зв'язані термічна втомність, окислостійкість, жаростійкість та інші явища, що в значній мірі визначають несучу спроможність матеріалу деталей, які знаходяться під високими тепловими впливами.

Загальною рисою, характерною для умов теплообміну деталей, що працюють при високих температурах, являється зміна з часом коефіцієнту теплообміну та температури навколишнього середовища. В зв'язку з цим у даній главі розв'язані задачі теплопровідності для тіл різної форми, коли коефіцієнт теплообміну та температура теплоносія деяким способом змінюються з часом. При цьому використовується запропонований у цій дисертації метод РПЗ. Відмінною особливістю процедури застосування методу у даному випадку є зображення функції коефіцієнта теплообміну експоненціальним або тригонометричним рядом з наступним застосуванням інтегрального перетворення Лапласа-Карсона до початкової системи рівнянь. Безпосередньо метод збурення застосовується до утвореного в результаті перетворення функціонального рівняння. Одержані розв'язання просто реалізуються при числових розрахунках. Крім того, було виконано розв'язання задачі теплопровідності при нелінійних граничних умовах, якими є в багатьох випадках реальні умови в практиці експлуатації деталей металургійного обладнання та при нагріві різних виробів у нагрівальних печах.

Практична застосовність одержаних аналітичних залежностей була підтверджена при теоретичному та експериментальному дослідженні температурного поля хобота завалювальної машини мартенівської печі, працюючого в умовах періодичної зміни з часом коефіцієнта теплообміну та температури тепловіддавального середовища при високоінтенсивних теплових та механічних впливах.

Дослідження ряду марок сталі на опір термічній втомності в умовах, що моделюють температурні зміни хобота, а також результати випробування цих сталей на розтягнення та спрацьованість при підвищених температурах дозволили встановити, що для виготовлення хоботів завалювальних машин доцільно застосовувати сталі, що мають достатню термовтомну стійкість. Зокрема, виробничі випробування показали, що при заміні сталі 25Л на сталь 30ХГСА стійкість хобота зростає у 2-3 рази. Іншим варіантом підвищення стійкості є наплавка хобота сормайтотом, що застосовується у цей час (Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського).

Були проведені теоретичні дослідження та промислові випробування нагріву сталених заготовок у камерних печах із врахуванням істотної нелінійності граничних умов нагріву, що дало можливість його скорочення (Баглійський завод котельно-допоміжного устаткування та трубопроводів).

Основні висновки та результати

1. Великі підприємства чорної металургії мають складний цикл металургійної переробки. Окремі етапи цього циклу органічно зв'язані один з іншим і являють собою складні теплові та фізико-хімічні процеси. Дослідження будь-якого етапу з метою удосконалення його технології має рацію тільки в тому випадку, коли при цьому беруться до уваги особливості суміжних етапів. Звідси виникає необхідність комплексних досліджень теплових процесів, що відбу-

ваються на протязі технологічного ланцюга металургійного виробництва і які включають у себе плавлення, затвердіння, нагрів та обробку металу тиском. Ці дослідження можна виконувати на основі інструментального виміру температур і теплових потоків в металургійному агрегаті або об'єкті, що обробляється, але це важко (а то і неможливо) і дорого. Окрім цього, точність таких вимірів невисока. А можна отримати цю ж інформацію, не менш надійну, але дешевшими математичними методами. Звичайно, це можна зробити тільки при чіткій математичній постановці задачі, знаючи фізичну картину досліджуваних процесів, маючи відповідний метод розв'язання та достатню кваліфікацію металурга-вченого або інженера.

2. Вивчення математичними методами теплових процесів металургійного виробництва являє собою більш високу ступінь дослідження порівняно з якісними і, лише іноді, кількісними фізико-хімічними аналізами, оскільки після побудови математичної моделі ми вводимо строгі кількісні співвідношення між окремими складовими явищ, що вивчаються.

3. Для здійснення згаданих вище комплексних досліджень було необхідно розробити спеціальний математичний підхід, що дозволяє розв'язувати задачі теплопровідності при рухомих границях розмежування фаз, внутрішньому вимушеному конвективному масопереносі, а також при нелінійних граничних умовах. Як такий підхід, автор дисертації запропонував аналітичний метод редукції та параметричного збурення (РПЗ).

Для розв'язання складних задач теплопровідності з врахуванням двовимірності та гетерогенності температурного поля, внутрішнього конвективного переносу маси, переміщення границі об'єкта, що деформується, та температурної залежності коефіцієнтів теплопереносу автором запропонована і реалізована на ЕОМ сіткова

модель.

Адекватність розроблених математичних моделей реальним процесам визначалась або експериментальним шляхом, або порівнянням із апробованими результатами інших авторів.

4. На прикладі дослідження динаміки плавлення тіл були показані особливості застосування методу редукції та параметричного збурення до розв'язання нелінійних задач теплопровідності з рухомими границями, коли закон руху границі розмежування фаз є невідомий і зумовлений кінетикою процесу.

Одержані математичні співвідношення являють собою явні функції і їх обчислення є можливим без залучення складної та дорогоцінної обчислювальної техніки, що є неминучим при чисельних методах.

5. Використовуючи вказані функції, були проведені розрахунки, що охоплюють широкий спектр різних варіантів процесів плавлення у чорній металургії. Результати цих розрахунків приведені в дисертації у вигляді номограм, застосування яких дає інженеру-металургу або досліднику можливість швидкого аналізу динаміки плавлення тіл, не звертаючись до створення нових складних математичних моделей або проведення трудомістких експериментів.

6. На основі методу РПЗ знайдені аналітичні залежності, що визначають характер просунення границі розмежування фаз та розподілу температури у твердій та рідкій частинах плоского та циліндричного зливків у процесі їх затвердіння у виливниці, на повітрі, а також при нагріві у нагрівних колодязях.

Суттєвим результатом є можливість визначити момент завершення затвердіння зливків у нагрівних колодязях і, таким чином, виключити можливість їх видачі у прокат при наявності рідкої серцевини.

7. Були виконані розрахунки затвердіння зливків при охолод-

женні у виливницях та нагріві у нагрівних колодязях. Показано, що теоретичні результати роботи являються засобом для правильного визначення (а у ряді випадків скорочення) тривалості нагріву зливків з незатверділою серцевиною.

Знайдені теоретичні залежності послужили основою розробки на деяких підприємствах нових технологічних інструкцій для енергозберігаючого нагріву металу в колодязях.

8. Проведено аналіз умов зовнішнього теплообміну при обробці металів тиском. В результаті запропонована нова методика і складені номограми для визначення середньомасової температури при прокатці дрібносоротної сталі, що знайшло практичне застосування при розробці та впровадженні у виробництво нової технології прокатки кутових профілів в умовах Дніпровського металургійного комбінату ім. Дзержинського.

9. Встановлено, що при прокатці на обтискних станах має місце суттєва різниця між температурою поверхні та середньою температурою розкату (декілька сот градусів). Головні температурні зміни при цьому відбуваються у приконтатному шарі товщиною 30-50 мм. Цю обставину необхідно приймати до уваги при проектуванні технології прокатки на обтискних станах, оскільки такі характеристики як міцність, спрацьованість та термовтомність валків та привалкової арматури, а також енергосилові параметри у значній мірі залежать від температури та механічних властивостей вказаного шару.

10. На ряді металургійних підприємств був проведений комплексний аналіз, який включав у себе теоретичні та експериментальні дослідження теплових процесів при затвердінні, охолодженні, нагріві, і прокатці сталених зливків, а також виробничі випробування. На основі цього аналізу були розроблені нові технологічні інструкції, що дозволило скоротити тривалість нагріву

зливків в основному на 10-15 хв. без погіршення якості готового прокату (Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського - стани 1050 і 1150, Дніпропетровський металургійний комбінат ім. Петровського - стан 1050, Сумгаїтський трубопрокатний завод - стан 850).

Такий аналіз дав позитивні результати тільки завдяки комплексному дослідженню технологічного ланцюга "затвердіння - охолодження - нагрів - прокатка" як єдиного цілого. Це дає право вважати, що проведення комплексних досліджень є необхідним при розробці енергозберігаючих технологій у чорній металургії. Необхідні для цього математичні моделі запропоновані у дисертації.

11. Сформульована фізично, подана у математичних термінах і реалізована скінченно-різницеvim методом на ЕОМ задача теплопровідності для порожнистої циліндричної гільзи при її розкатці з врахуванням гетерогенності температурного поля, температурної залежності коефіцієнтів теплопереносу, змінення з часом положення зовнішньої поверхні, внутрішнього конвективного масопереносу та дисипації енергії пластичного формозмінювання.

12. Виконані на ЕОМ обчислення показують, що у кінці прокатки по перерізу заготовки встановлюється істотно нерівномірне температурне поле. Особливо велика різниця температури спостерігається між поверхневими та серединними частинами заготовки поблизу торців, що сприяє невиконанню заданого профілю гільзи та погіршенню якості поверхні прокату.

Зазначений факт вимагає прийняття спеціальних заходів по оптимізації температурного поля прокатуваної гільзи. Одним із її шляхів може бути зміна форми торцевих частин або установка проміжного підогріву, що компенсував би нерівномірність температурного розподілу в кінці прокатки.

13. Методом РПЗ розв'язана задача теплопровідності при ча-

совій залежності коефіцієнта теплообміну та температури навколишнього середовища, а також при нелінійних граничних умовах.

Практична застосовність одержаних при цьому результатів була підтверджена при теоретичному та експериментальному дослідженні температурного поля хобота завалочної машини мартеновського цеху. Дослідження ряду марок сталі на опір термічній втомності в умовах, моделюючих температурні змінення хоботів, показало, що для їх виготовлення доцільно використовувати сталі, що мають достатню термовтомну стійкість.

Були проведені теоретичні дослідження та промислові випробування нагріву сталених заготовок у камерних печах при істотній нелінійності граничних умов нагріву, що дало можливість його скорочення.

14. Подані у дисертації результати досліджень являються одним із джерел подальшого вдосконалення технології металургійного виробництва із врахуванням питань енерго- та ресурсозбереження.

Основний зміст дисертації відображено у працях:

КНИГИ

1. Тылкин М.А., Яловой Н.И., Полухин П.И. Температуры и напряжения в деталях металлургического оборудования. - М.: Высшая школа, - 1970. - 428 с.

2. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением /Н.И. Яловой, М.А.Тылкин, П.И. Полухин, Д.И. Васильев. - М.: Высшая школа, - 1973. - 630 с.

3. Качество листа и режимы непрерывной прокатки /П.И. Полухин, Д.Н. Заугольников, Н.И. Яловой и др. - Алма-Ата: Наука 1974. - 400 с.

ІНШІ ПУБЛІКАЦІЇ

4. Исследование температурного поля и термических напряже-

ний в хоботах завалочных машин // М.А.Тылкин, Н.И. Яловой, Н.Ю. Тайц и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1966. - № 11. - С. 195 - 200.

5. Термические напряжения в пластинах при периодических тепловоздействиях. - Сообщение 1. /Н.И. Яловой, Н.Ю. Тайц, М.А.Тылкин и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1967. - № 1. - С. 175 - 178.

6. Температурный режим проводок прокатных станов. /Н.Ю. Тайц, Н.И. Яловой, М.А.Тылкин и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1967. - № 4. - С. 176 - 179.

7. Термические напряжения в пластинах при периодических тепловоздействиях. - Сообщение 2. /Н.И.Яловой, Н.Ю.Тайц, М.А.Тылкин и др. // Изв.вузов.Черная металлургия.-1967.-№5.-С.145 - 148.

8. Исследование термических напряжений и износостойкости в проводках прокатных станов. /Н.Ю. Тайц, Н.И. Яловой, М.А.Тылкин и др. // Изв. вузов.Черная металлургия. - 1967. - №8. - С. 165 - 168.

9. Тайц Н.Ю., Яловой Н.И. Исследование температурного поля высокой полосы в очаге деформации. // Металлургическая и горнорудная промышленность: Научно-техн. и производственный сб. - 1968. - № 4. - С. 43 - 46.

10. Любов Б.Я., Яловой Н.И. Теплопроводность тела при переменном коэффициенте теплоотдачи. // Инж.-физ. журн. - 1969. - т. 17. - № 4. - С. 679 - 687.

11. Яловой Н.И., Тайц Н.Ю., Иванченко Г.И. Термические напряжения в цилиндре при циклическом изменении температуры. // Прикладная механика. - 1969. Т. 5. - вып. 9. - С. 20 - 26.

12. Яловой Н.И. Плавление сферы. // Тез. докл. I-й Респ. конференции молодых ученых-металлургов. - Днепропетровск,

1969. - С. 43 - 45.

13. Яловой Н.И. Нагрев полупространства при переменном коэффициенте теплоотдачи. // Тез. докл. I-й Респ. конференции молодых ученых-металлургов. - Днепропетровск, 1969. - С. 14 - 17.

14. Любов Б.Я., Яловой Н.И. Математический анализ плавления тел. // Изв. АН СССР. Металлы. - 1970. - № 2. - С. 152 - 162.

15. Любов Б.Я., Яловой Н.И. Определение температуры металла при прокатке на обжимных станах. // Metallургическая и горнорудная промышленность: Научно-техн. и производственный сб. - 1970. - № 3. - С. 49.

16. Любов Б.Я., Яловой Н.И. К вопросу о теплообмене при прокатке листа. // Инж.-физ. журн. - 1971. - Т. XX. - № 2. - С. 321 - 328.

17. Температурные изменения в раскате при прокатке слябов. Тылкин М.А., Яловой Н.И. // Metallургическая и горнорудная промышленность: Научно-техн. и производственный сб. - 1971. - № 5. - С. 38 - 40.

18. Исследование температуры слитков при охлаждении и нагреве. / Н.И. Яловой, Л.В. Судоплатов, А.Ф. Рыжов и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность: Научно-техн. и производственный сб. - 1971. - № 2. - С. 37 - 39.

19. Совершенствование нагрева слитков в рекуперативных нагревательных колодцах. / Л.В. Судоплатов, Н.И. Яловой, А.Ф. Рыжов и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность: Научно-техн. и производственный сб. - 1971. - № 3. - С. 42 - 44.

20. Охлаждение и нагрев плоских слитков. / Н.И. Яловой, Б.Я. Любов, А.Ф. Рыжов и др. // Инж.-физ. журн. - 1971. - Т. 21. - № 6. - С. 1120 - 1121.

21. О нагреве металла в методических печах. / А.М. Саксаганский, Н.И. Яловой, Л.В. Судоплатов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность: Научно-техн. и производственный сб.* - 1971. - № 6. - С. 42 - 43.

22. Температура металла при деформации / Н.И. Яловой, В.П. Полухин, М.А. Тылкин и др. // В сб.: *Пластическая деформация металлов и сплавов.* - М.: *Металлургия*, 1972. - № 66. - С. 66 - 67.

23. Аналитическое исследование температуры деформируемого металла. / Н. И. Яловой, В. П. Полухин, М. А. Тылкин и др. / *Изв. вузов. Черная металлургия.* - 1972. - № 3. - С. 106 - 109.

24. Анализ потерь тепла нагретых слитков при транспортировке их к вадкам блюминга. / Н. И. Яловой, И. С. Решетняк, А. Ф. Рыжов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность. Научно-техн. и производст. сб.* - 1972. - № 2. - С. 84 - 86.

25. Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И. К аналитическому исследованию температуры металла при прокатке на обжимных станках. // В сб. *Пластическая деформация металлов и сплавов.* - М.: *Металлургия*, 1972. - № 71. - С. 88 - 91.

26. Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И. Инженерная задача теплопроводности для деформируемого металла. // В сб. *Пластическая деформация металлов и сплавов.* - М.: *Металлургия*, 1972. - № 71. - С. 88 - 91.

27. Исследование температурного поля деталей прокатного оборудования. / Н. И. Яловой, В. П. Полухин, М. А. Тылкин и др. / *Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. Всесоюз. конф.* - Тольятти. - 1972. - С. 42 - 44.

28. Яловой Н.И., Рыжов А.Ф. Исследование динамики охлаждения слитка весом 5, 7 т после разливки и режима нагрева его в колодцах. // *Реферат. информ. Металлургическая промышленность.* - Киев: *Выща школа*, 1972. - вып. 5. - С. 36 - 37.

29. Любов Б. Я., Яловой Н. И., Манусов И. Н. Теплопроводность при произвольном периодическом изменении коэффициента теплообмена и температуры окружающей среды. // Инж.-физ. журн. - 1972. - № 6. - С. 1121 - 1122.

30. Любов Б.Я., Яловой Н.И. Внутренний теплообмен в пластинах при нелинейных граничных условиях. // Инж.-физ. журн. - 1972. - Т. 22. - № 6. - С. 1120.

31. Яловой Н.И. Температура деформируемого металла. // Тез. докл. на Всесоюзном научном совещании по тепловым напряжениям в элементах конструкций. - Канев, 1972. - С. 57.

32. Анализ температуры раската при прокатке листа на стане 1700. /Яловой Н.И., Полухин В.П., Смородский В.В. и др. // Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. Всесоюзн. конф. - Тольятти. - 1972. - С. 47 - 50.

33. Температурные изменения в раскате при прокатке на стане 1700. /Н. И. Яловой, В.П. Полухин, А. Ф. Рыжов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1973. - № 4. - С. 109 - 112.

34. Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И. Температурное поле раската при прокатке на обжимных станах. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1973. - № 11. - С. 73 - 76.

35. Яловой Н.И. Теплообмен в деформируемом твердом теле. // Повышение производительности и экономичности печей для нагрева металла: Тез. докл. Респ. конференции. - Днепропетровск, 1973. - С. 17 - 19.

36. Yalovoy N. Heat and Mass Transfer Problems in Modern Metallurgy, //The Second Metallurgical Conference in A.R.E. - Cairo, 1978. - p. 143 - 153.

37. Yalovoy N. et. al. Effect of Different Factors of the Preheating Conditions of Tundish. //The Second Metallurgical Conference in A.R.E. - Cairo, 1978. - p. 417 - 436.

38. Огурцов А.П., Яловой Н.И., Рыжов А.Ф. Плавление пластины при несимметричных граничных условиях. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1979. - № 10. - С. 79 - 83.

39. Яловой Н.И., Рыжов А.Ф. Анализ нагрева полностью затвердевших слитков. // Вопросы совершенствования тепловой работы и конструкций металлургических печей: Тез. докл. Республ. научно-техн. конференции. - Днепропетровск, 1981. - С. 163.

40. Яловой Н.И., Рыжов А.Ф. Математический анализ затвердевания слитков. // Вопросы совершенствования тепловой работы и конструкций металлургических печей: Тез. докл. Республ. научно-техн. конференции. - Днепропетровск, 1981. - С. 75.

41. Яловой Н.И., Рыжов А.Ф., Литвинов Ю.В. Исследование методом возмущений затвердевания цилиндрического слитка. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1983. - № 8. - С. 96 - 98.

42. Яловой Н.И., Рыжов А.Ф. Метод возмущений в технологических задачах теплообмена с подвижными границами. // Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. Всесоюз. конференции. - Ташкент, 1984. - С. 15.

43. Яловой Н.И., Бобров В.В. Температурное поле полого цилиндра при пластической деформации. // Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. Всесоюз. конференции. - Ташкент, 1984. - С. 55.

44. Рыжов А.Ф., Яловой Н.И. Решение методом возмущений задачи о нагреве полностью затвердевших слитков. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1985. - № 2. - С. 93 - 95.

45. Яловой Н.И., Бобров В.В. Температурное поле полого цилиндра при прокатке на оправке. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1985. - № 4. - С. 97 - 100.

46. Яловой Н.И., Словиковский П.А. Математическое моделирование нагрева металла в камерных печах при изменяющейся массе

садки. // Теория и практика тепловой работы металлургических печей: Тез. докл. Республ. научно-техн. конференции. - Днепропетровск, 1988. - С. 175.

47. Яловой Н.И., Проскурня А.Я., Смородский И.В. Решение задачи плавления в обобщенной постановке. - В сб. Разработка прогрессивных энергосберегающих теплотехнологических процессов и оборудования. Днепродзержинск, 1988. - С. 36 - 40. Рукопись представлена Днепродзержинским индустриальным институтом. Деп. в УкрНИИТИ 19.09.1988, № 2402 - Ук 88.

48. Яловой Н.И., Словиковский П.А. Нагрев мелких заготовок в слое переменной толщины. // Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии: Тез. докл. Республ. научно-техн. конференции. - Днепропетровск, 1989. - С. 47.

49. Яловой Н.И. Расчет нагрева мелких заготовок в слое. // Прогрессивная технология и оборудование для нагрева заготовок под ковку, штамповку, термообработку. Автоматизация и механизация средств нагрева: Тез. докл. Семинар. - ЦНИИИТЭИ. - Москва, 1990. - С. 57.

Annotation

Yalovy M. I. Development of the theory of and combined research into the thermal processes of the metallurgical industry with the purpose of its technology improving.

Thesis for a technical sciences doctor's degree on the 05.16.02 speciality - Ferrous Metallurgy. Dneprodzerzhinsk State Technical University. Dneprodzerzhinsk, 1995.

49 scientific works containing combined theoretical researches into heat and mass transfer processes occurring in the technology line of iron and steel production and results of experimental researches are defended. It was established that such researches represent themse-

ives a serious source of the technology improvement. Specifically, on the basis of their results, new technological instructions were worked out and adopted into the industry. At some plants it gave 10-15 min. shortening of the steel ingot heating duration and obtaining of an essential economy effect without deteriorating the final product quality.

АННОТАЦИЯ

Яловой Н.И. Развитие теории и комплексное исследование тепловых процессов металлургического производства с целью совершенствования его технологии.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - Металлургия черных металлов, Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск, 1995.

Защищается 49 научных работ, которые содержат комплексные теоретические исследования процессов тепломассообмена, происходящих в технологической цепи металлургического производства, а также результаты экспериментальных исследований. Установлено, что такие исследования являются серьезным источником совершенствования технологии. В частности, на основе их результатов были разработаны и внедрены на ряде предприятий новые технологические инструкции, позволившие сократить длительность нагрева стальных слитков на 10 - 15 минут без ухудшения качества готового проката и получить существенный экономический эффект.

Ключові слова:

металургія, теплові процеси, комплексні дослідження, енергозбереження.

Підписано до друку 31.08.1995. Формат 60x84 1/16.

Обсяг 2 ум.арк. Тираж 110 прим. Зам.240.Безкоштовно,резограф ДДТУ, 322618, Дніпродзержинськ,вул.Дніпробудівська,2.

446000

AB 33.213