

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

На правах рукопису

ІЛЬЧЕНКО Кіра Дмитрівна

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА КОМПЛЕКСНЕ ВИЗНАЧЕННЯ
ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НОВИХ
МАТЕРІАЛІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

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

Дніпропетровськ — 1994

Дисертація в рукописом.

Роботу виконано у Державній металургійній академії України.

Науковий консультант - доктор технічних наук Хейфець Р.Г.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Губинський В.Я;
доктор технічних наук, професор Горбунов О.Д.;
доктор технічних наук, професор Біляев М.М.

Провідне підприємство - Державний Нікопольський завод феросплавів (м. Нікополь Дніпропетровської області)

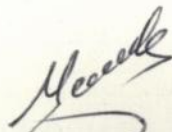
Захист дисертації відбудеться *"18 лютого 1994р.* о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої ради Д 068.02.02 при Державній металургійній академії України.

Адреса: 320635, МСП, м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державної металургійної академії України.

Автореферат розіслано *"31 серпня* 1994р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
професор, доктор технічних наук



В.К.Цапко

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00756614 (Т)

ЛНБ ім. В. Стеф
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Технічний прогрес у чорній металургії України в наш час може бути забезпечений тільки шляхом більш повного використання сировини, що добувається, забезпечення глибокої її переробки та зростання виробництва підготовлених високоякісних металургійних матеріалів, до яких належать: концентрати, агломерати, брикети, обкотиші, доменні та спеціальні види коксу та ін. Актуальними є всебічна інтенсифікація технологічних процесів та втілення прогресивних технологій, що поліпшують якість готової продукції. Відходи металургійного виробництва, такі як шлаки, пил газоочисток та ін. є вторинною сировиною і повернення їх до технологічного процесу дозволяє знизити матеріальні та енергетичні витрати на виробництво основного продукту та поліпшити екологічне становище за рахунок зменшення викидів та накопичення відходів.

Фізико-хімічна обробка металургійних матеріалів складається з нагріву, плавлення, отвердіння, хімічних та фазових перетворень, для яких важливими є процеси переносу теплоти та маси. Останні характеризуються теплофізичними властивостями матеріалів, що беруть участь в процесі. Таким чином, дослідження теплофізичних властивостей широкого спектру матеріалів металургійного виробництва є актуальним, тому що знання цих властивостей в ряді випадків дозволяє знизити витрати теплоти та електроенергії на виробництво металургійної продукції. Крім того, теплофізичні властивості необхідні для розрахунків та проектування нових металургійних агрегатів та налагодження роботи існуючого устаткування.

Дослідження процесів переносу теплоти обов'язково зв'язане з вирішенням диференційного рівняння теплопровідності, до якого входять теплофізичні характеристики. У високоінтенсивних теплових процесах чорної металургії залежність теплофізичних властивостей від температури дуже впливає на теплову роботу металургійних агрегатів. Зараз, при обчисленні та конструюванні агрегатів частіше використовуються сталі чи середні теплофізичні характеристики.

Ця робота заловнює пробіли, що мають місце в дослідженні

залежності теплофізичних властивостей матеріалів металургійного виробництва від температури та інших параметрів.

Робота виконувалась відповідно з наказом Мінчормету СРСР N 758 від 31.12.69 р. та N 432 від 03.05.79 р., в рамках задачі, що поставлені Всесоюзною міжвузівською комплексною цільовою програмою "Метал", затвердженою наказом Мінвузу СРСР N 452 від 12.04.82 р. та Регіональною комплексною цільовою науково-технічною програмою "Сталь" (розділ 2 "Марганець"), затвердженою Президією АН УРСР, а також у відповідності з наказом N 1 по КВФ "Союферосплав" від 04.01.87 р. та Державною науково-технічною програмою ДКНТ України Б.3.7. "Переробка відходів промисловості металургійного та гірничобогачувального виробництва".

Ціль роботи

Розробка нових високоефективних методів визначення теплофізичних властивостей матеріалів у залежності від температури та створення на їх основі комплексу дослідницького устаткування з широким температурним діапазоном дослідження.

Створення довідкової бази теплофізичних властивостей для матеріалів таких металургійних переділів як коксохімічне, доменне, сталеплавильне, ливарне, феросплавне виробництва.

Одержання принципово нових залежностей теплофізичних властивостей матеріалів металургійного виробництва від складу та температури за допомогою планування експерименту.

Застосування результатів дослідження теплофізичних властивостей матеріалів до розв'язання актуальних задач металургійного виробництва та боротьбу з охолоддю доменних печей, економію енерговитрат та збільшення виходу придатного продукту.

Наукова новизна

Одержано нове рішення зворотної коефіцієнтної задачі теплопровідності.

Розроблено нові методи дослідження теплофізичних властивостей матеріалів: метод оболонки, метод балансу тепла, метод регулярного режиму щодо тіл довільної форми.

На базі розроблених методів створені установки: ВТМ-ДФ (визначення теплофізичних властивостей матеріалів довільної форми), яка працює в квазістаціонарному режимі та використовується для дослідження зразків плоскої форми; ВТМ-РР (визначення теплофізичних властивостей матеріалів у регулярному режимі), яка

дозволяє визначити коефіцієнт температуропровідності кускових матеріалів довільної форми; ВТМ-1 (визначення теплофізичних властивостей матеріалів), яка працює у квазістаціонарному режимі та використовується для визначення комплексу теплофізичних характеристик дисперсних і суцільних матеріалів у формі циліндру.

На установках ВТМ-ДФ і ВТМ-РР вперше досліджено теплофізичні властивості доменного гарнісажу, доменного та формованого коксів у вигляді кусків довільної форми.

Для дисперсного піношамоту, трьохкомпонентної шихти силіко-марганцю та рудно-вугільних сумішей з домішкою полімеру вперше одержано математичні моделі залежності теплофізичних властивостей від складу і температури та діаграми "склад - теплофізичні властивості" для різних температур в результаті застосування планування експерименту до дослідження теплофізичних властивостей. Ці моделі та діаграми дозволяють прогнозувати теплофізичні властивості в залежності від складу матеріалів і знаходити компонентний склад сумішей із заданими теплофізичними властивостями.

Вперше одержано теплофізичні властивості в залежності від температури таких матеріалів металургійного виробництва: марганцевмісткої сировини, шихт, шлаків і спеціальних коксів феросплавного виробництва, марганцевих і залізородних обкотишів, різних вуглецевих матеріалів та їх сумішей з іншими матеріалами, доменних, конвертерних і синтетичних шлаків, ливарних сумішей, вапняків, вапна та вогнетривких матеріалів в інтервалі температур 100...1100 °С. Здобуто рівняння залежності теплофізичних властивостей від температури.

За допомогою досліджених теплофізичних властивостей матеріалів вирішено актуальні задачі металургійного виробництва: одержано аналітичне рішення задачі плавлення та твердіння гарнісажного шару з урахуванням динаміки розподілу температури у шарі гарнісажу та залежності теплофізичних властивостей гарнісажу від температури, яке дозволяє знайти шляхи зменшення охолодді; знайдено оптимальне сполучення теплоізолюючих матеріалів додаткової надставки виливниці, що дозволяє підвищити вихід придатного продукту.

Сукупність одержаних в роботі результатів, теоретичні розробки та їх реалізація класифікуються як викладення науково обґрунтованих технічних рішень щодо дослідження теплофізичних

властивостей матеріалів, впровадження яких вносить значний внесок у прискорення науково-технічного прогресу.

Практичне значення та результати реалізації роботи. Створено комплекс дослідницького устаткування, яке дозволяє одержати необхідні та достовірні відомості щодо теплофізичних властивостей матеріалів. Розроблено та вдосконалено методики обробки даних теплофізичного експерименту.

Установка ВТЕМ-1 паспортизована. Розроблена автором технічна документація на цю установку та методика обробки експериментальних даних передані на Павлоградський завод стінових матеріалів, де установка використовується з 1978 р. для забезпечення контролю теплофізичних властивостей базальтового картону.

На кафедрі промислової теплоенергетики Державної металургійної академії України установка ВТЕМ-1 широко використовується у навчальному процесі. На ній виконуються лабораторні роботи з дисципліни "Тепломасообмін", а також науково-дослідницькі та дипломні роботи студентів, що пов'язані з вивченням теплофізичних властивостей матеріалів.

На кафедрі електрометалургії споруджено установку ВТЕМ-1, яка використовується у галузевій науково-дослідницькій лабораторії електротермічних процесів та установок для дослідження теплофізичних властивостей вуглецевих матеріалів.

Технічна документація на установку ВТЕМ-1 і методика обробки експериментальних даних для використання в навчальному процесі передані на кафедру металургії чорних металів Груаїнського технічного університету та з науковою метою - у проблемну лабораторію нових металургійних процесів Державної металургійної академії України.

Теплофізичні властивості сирової та випаленої гідрогематитової руди (залізного сурику) Криворізького родовища використані Санкт-Петербурзьким НВО "Пігмент" для проектування промислової установки ступінчастого низькотемпературного анехлоруючого випалювання залізного сурику.

Результати дослідження теплофізичних властивостей матеріалів використанні (впроваджені) в таких переділах металургійного виробництва:

у коксохімічному виробництві дослідження теплофізичних властивостей рудно-вуглецевих сумішей з полімерною домішкою дозволили знайти, що коефіцієнт теплопровідності є найбільш

суттєвою властивістю, яка впливає на^о інтенсивність процесу коксування та якість готового виробу, а також знаходить компонентний склад сумішей, що спрямовано впливає на процес спікання та якість коксу;

в доменному виробництві результати дослідження теплофізичних властивостей конверторних шлаків підприємств галузі використані Інститутом чорної металургії АН України для виконання проекту "Розробка технологій, що забезпечують втягнення відходів металургійного виробництва в якості аворотного продукту до металургії", а результати дослідження теплофізичних властивостей феросплавних шлаків - для освоєння у промислових умовах технології виробництва литого фракціонованого щебеню з відвального шлаку металевого марганцю з метою використання його у шихті доменних печей;

в сталеплавильному виробництві результати дослідження теплофізичних властивостей шихтових компонентів та шихт для виплавлення синтетичних шлаків використані для розрахунку параметрів циклону для одержання синтетичних шлаків у конверторному цеху заводу ім. Петровського (м. Дніпропетровськ), спроектованого УкрДіпрометом. На основі використаних досліджень теплофізичних властивостей шихтових матеріалів циклонної плавки показано, що шихта, яка застосовується на заводі, не є оптимальною з точки зору теплоємності і може бути замінена низькотеплоємною шихтою з інших матеріалів, шлак з якої не поступається застосовуваному по своїм рафінуючим властивостям.

Результати дослідження теплофізичних властивостей лігніну та теплоізолюючих сумішей з матеріалів на основі лігніну використано Волгоградською філією Державного проектного інституту "Діпробіосинтез" при проектуванні цеху для виробництва теплоізолюючих сумішей для рідкої сталі на основі лігніну для Івдельського і Тавдинського гідролізних заводів. Теплофізичні властивості використано для розрахунку параметрів сушіння та випалювання (піролізу) лігніну з різними мінеральними наповнювачами та вибору устаткування для охолодження готового продукту.

Дослідження теплофізичних властивостей утеплювальних сумішей і вкладишів, які застосовуються для ізолювання додаткової надставки виливниці при розливанні сталі, дозволили вибрати для неї оптимальне сполучення теплоізолюючих матеріалів, які забезпечили зменшення головної обрізи на 1,6 % та збільшення виходу

придатного. Економічний ефект для умов металургійного заводу ім. Петровського склав 1 крб./т сталі, що роаливається (у цінах 1991 р.);

в ливарному виробництві результати дослідження теплофізичних властивостей щербенистого та гранульованого відвального шлаку феромарганцю Нікопольського заводу феросплавів, який використовується замість вапняка при виплавленні високомарганцовистої сталі Г13Л в цеху N 1 Дніпропетровського стрілочного заводу та вальцеливарному цеху Кущівського заводу прокатних валків, дозволили встановити зниження витрат тепла на нагрівання шихти при відповідності хімічного складу металу та механічної міцності вимогам Державних стандартів.

Дослідження теплофізичних властивостей металевонаповнених ливарних сумішей дозволили створити нові суміші з чавунним шротом, які мають різноманітні теплофізичні властивості (коефіцієнт теплопровідності та теплоаккумуляційна властивість), які використані інститутом проблем технології машинобудування (м. Краматорськ) для виготовлення щільних сталевих виливок за рахунок їх диференційного охолодження.

Результати дослідження теплофізичних властивостей ливарних сумішей для металокерамічних форм для насосного машинобудування на основі алюмінієвих порошоків використано інститутом насосного машинобудування (м. Каазань), Каазанським компресорним і Каазанським механічним заводами.

В результаті дослідження теплофізичних властивостей вогнетривких красок було знайдено регламентований рівень термічного опору покриття форми для відливки прокатних валків;

у феросплавному виробництві дослідження теплофізичних властивостей шихт з різноманітними домішками та замінами дозволили знайти склади шихт з низькою теплоємністю, не вдаючись до промислового експерименту, що дорого коштує, та повернути відходи, що раніше не використовувалися, до технологічного процесу. З цією метою досліджені: шихта середньовуглецевого феромарганцю з випал-гравітаційним карбонатним концентратом, який замінює дефіцитний оксидний концентрат; шихти високовуглецевого феромарганцю з високоофлюсованим агломератом, який замінює традиційний агломерат і вапняк; шихти переробного силікомарганцю з лігнобрикетами, які частково замінують кокс, з доломітом, який замінює вапняк; шихти товарного силікомарганцю з брикетами з суміші пилу

сухої та шламу мокрої газоочисток електропечей, що замінюють традиційний агломерат; шихти малофосфористого шлаку з застосуванням відходів виробництва високоглиноземистого алюмінію та коксохімічних заводів, що замінюють кварцит; шихти синтетичного шлаку. Застосування цих шихт дозволяє заощаджувати теплоту та електроенергію.

Дослідження теплофізичних властивостей електродних мас та самовипалюючихся електродів дозволило дати рекомендації, що підвищили стійкість електродів.

Дослідження теплофізичних властивостей вуглецевих футерувальних блоків печі РПЗ-40Ц11 для виплавлення феронікелю Побузького нікелевого заводу дозволило визначити, через що стався пролив розплавом футеровки печі.

Річний економічний ефект від впровадження склав 1297 тис. крб. у цінах 1991 р.

Апробація роботи. Результати роботи доповідалися на Міжнародній, 17 Всесоюзних та 12 Республіканських конференціях і нарадах, а також на ХХІ Сибірському теплофізичному семінарі, та на наукових семінарах кафедр промислової теплоенергетики, тепло-техніки та екології металургійних печей і секції металургійних печей НТТ металургів України.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 64 друкованих праці і отримано позитивне рішення Держкомвинаходу СРСР про видання авторського свідоцтва на винахід. За матеріалами роботи підготовлений та знаходиться у друку довідник з теплофізичних властивостей матеріалів металургійного виробництва.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 8 розділів, заключної частини, містить: 298 с. машинописного тексту, 139 малюнків, 162 таблиці, список літератури з 253 назв, додатки.

Головні позиції, що виносяться на захист
нове рішення зворотної коефіцієнтної задачі теплопровідності;

розроблені нові методи дослідження теплофізичних властивостей матеріалів: метод оболонки; метод балансу тепла; метод регулярного режиму щодо тіл довільної форми;

конструкції нових установок, створених на базі розроблених методів: ВТЕМ-ДФ, що використовується для визначення комплексу теплофізичних властивостей тіл довільної форми, близьких до

плоских, у квазістаціонарному режимі; ВТМ-РР, що служить для визначення коефіцієнту температуропровідності тіл довільної форми у регулярному режимі; ВТМ-1, яка дозволяє визначати комплекс теплофізичних властивостей дисперсних та суцільних матеріалів в квазістаціонарному режимі;

нові результати дослідження теплофізичних властивостей складних матеріалів у вигляді діаграм "склад - теплофізичні властивості": дисперсного піношамоту, трьохкомпонентної шихти силікомарганцю та рудно-вугільних сумішей з полімерною домішкою, які одержані за допомогою використання планування експерименту в дослідженні теплофізичних властивостей, що дозволило прогнозувати властивості матеріалів у залежності від їхнього складу;

нові результати дослідження широкого спектру матеріалів металургійного виробництва, що спрямовані на одержання даних по новим матеріалам, властивості яких досліджено вперше, пошук низькотепломних шихт, повернення відходів до технологічних процесів з метою заощадження матеріальних ресурсів;

нові рішення актуальних задач металургійного виробництва: динаміки плавлення та утворення гарнісажного шару доменної печі з урахуванням залежності теплофізичних властивостей гарнісажу від температури та пошуку оптимального сполучення теплоізолюючих матеріалів додаткової частини виливниці з метою зменшення головної обрізі зливка.

З М І С Т Р О Б О Т И

1. МЕТОДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗВОРОТНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

Визначення теплофізичних характеристик (теплоємності, коефіцієнтів тепло- та температуропровідності), а також їх похідних базується на тому чи іншому розв'язанні внутрішньої зворотної задачі теплопровідності, під рішенням якої розуміють тільки метод обробки даних теплофізичного експерименту. Останній, що являє собою ідентифікацію теплофізичних характеристик, залишається за рамками зворотної задачі теплопровідності і складає окреме дослідження.

В роботі зроблено всебічний аналіз переваг і недоліків методів розв'язання зворотних задач теплопровідності. Показано, що

методи розв'язання цих задач поділяються на екстремальні та неекстремальні. В екстремальних методах виміряні температури порівнюються з температурами, обчисленими за рівнянням теплопровідності. Нев'язка між ними є керуючим елементом в пошуці розв'язання та параметром регуляризації. При пошуці мінімуму невязки багатократно моделюється процес теплопровідності. Екстремальні методи поділяються на автоматизовані і неавтоматизовані, та в обох випадках потребують залучення потужної аналогової або обчислювальної техніки. Неекстремальні методи поділяються на методи обернення розв'язку прямої задачі та обернення моделі, при цьому виміряна температура підставляється у математичну модель або аналітичний вираз розв'язку прямої задачі. Процедура звичайно зводиться до одноразового розв'язання рівняння або системи рівнянь, деколи з виконанням ітерацій для обліку нелінійностей.

В екстремальних і неекстремальних методах можуть бути використані як неперетворені моделі, так і попередньо спрощені шляхом використання підстановок або лініаризації. Оскільки обернені задачі теплопровідності належать до некоректних задач математичної фізики, то в багатьох випадках необхідна регуляризація розв'язків.

Не дивлячись на чисельність рішень зворотних задач теплопровідності, експериментальних установок, що базуються на цих рішеннях, дуже мало. Таким чином, існує певний розрив між теорією та практикою теплофізичного експерименту.

Вимоги до методу, на якому базується теплофізичний експеримент, можна сформулювати таким чином:

розв'язок оберненої задачі теплопровідності повинен відповідати найбільш простій схемі вимірювань у теплофізичному експерименті;

граничні умови та передумови методу повинні реалізовуватися практично;

метод повинен бути комплексним і мати широкий температурний діапазон;

методика обробки даних теплофізичного експерименту не повинна бути громіздкою, повинна мати мінімальний час обробки та не вимагати залучення спеціальних розрахункових пристроїв.

2. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ.

Для визначення теплофізичних властивостей матеріалів розроблені методи оболонки і балансу тепла у зразку, які базуються на оберненні розв'язку прямої задачі для багатшарової системи. Для тіл довільної форми інтерпретован метод регулярного режиму. Виконано рішення зворотної задачі теплопровідності шляхом обернення моделі для роздільної та одночасної ідентифікації теплофізичних властивостей.

Ідея методу оболонки полягає в тому, що оболонка з невідомими теплофізичними властивостями послідовно заповнюється матеріалами з відомою теплоємністю (еталонами).

Для плоскої оболонки перепад температур в i -тому шарі Δt_i пов'язаний з вхідним у шар q_i і вихідним із нього q_{i+1} тепловими потоками таким чином

$$2 \Delta t_i \frac{\lambda_i}{S_i} = q_i + q_{i+1}, \quad (2.1)$$

де λ_i і S_i - коефіцієнт теплопровідності і товщина i -того шару.

Тепловий баланс нагріву першого еталонного матеріалу в оболонці

$$2 \frac{\lambda_{об}}{S_{об}} F \tau_1 (\Delta t'_i - \Delta t'_{i+2}) = C_{об} t_{об} M_{об} + 2 C_1 t_1 M_1, \quad (2.2)$$

де $\lambda_{об}$ і $C_{об}$ - невідомі коефіцієнт теплопровідності і теплоємність оболонки;

$S_{об}$, $t_{об}$, $M_{об}$ - товщина, температура і маса оболонки;

C_1 , t_1 , M_1 - теплоємність, температура і маса першої еталонної речовини;

F і τ_1 - теплосприймаюча поверхня і час теплової дії;

$\Delta t'_i$ і $\Delta t'_{i+2}$ - перепади температур у обігріваному та охолоджуваному шарах оболонки у першому експерименті.

Після заміни першого еталонного матеріалу другим з відомою теплоємністю C_2 та масою M_2 , у другому досліді одержуємо

$$2 \frac{\lambda_{об}}{S_{об}} F \tau_2 (\Delta t_i'' - \Delta t_{i+2}'') = c_{об} t_{об} M_{об} + 2 c_2 t_2 M_2, \quad (2.3)$$

де τ_2 і t_2 - час теплової дії та середня температура матеріалу у другому досліді;

$\Delta t_i''$ і $\Delta t_{i+2}''$ - перепади температур в оболонці у другому досліді.

Рівняння (2.2) і (2.3) містять невідомі теплоємність і коефіцієнт теплопровідності оболонки.

$$c_{об} = 2 \frac{c_2 t_2 M_2 (\Delta t_i' - \Delta t_{i+2}') \tau_1 - c_1 t_1 M_1 (\Delta t_i'' - \Delta t_{i+2}'') \tau_2}{t_{об} M_{об} [(\Delta t_i'' - \Delta t_{i+2}'') \tau_2 - (\Delta t_i' - \Delta t_{i+2}') \tau_1]}, \quad (2.4)$$

$$\lambda_{об} = \frac{c_2 t_2 M_2 - c_1 t_1 M_1}{(\Delta t_i'' - \Delta t_{i+2}'') \tau_2 - (\Delta t_i' - \Delta t_{i+2}') \tau_1} \cdot \frac{S_{об}}{F}. \quad (2.5)$$

Таким чином, за два експерименти можна визначити теплоємність і коефіцієнт теплопровідності зразка, виконаного у вигляді плоскої оболонки. При цьому вимірююю підлягають перепади температур у шарах оболонки і середні температури еталонного матеріалу і оболонки.

Розрахункові формули для циліндричної і кулястої оболонки мають вигляд

$$c_{об} = \frac{c_2 t_2 M_2 \Delta t_1 \tau_1 - c_1 t_1 M_1 \Delta t_2 \tau_2}{t_{об} M_{об} (\Delta t_2 \tau_2 - \Delta t_1 \tau_1)} \left[1 + \frac{K_2(\omega_i)}{K_2\left(\frac{1}{\omega_i}\right)\omega_i} \right]; \quad (2.6)$$

$$\lambda_{об} = \frac{c_2 t_2 M_2 - c_1 t_1 M_1}{\Delta t_2 \tau_2 - \Delta t_1 \tau_1} \cdot \frac{S_{об}}{F} \left[\frac{1}{K_2(\omega_i)} + \frac{1}{K_2\left(\frac{1}{\omega_i}\right)\omega_i} \right], \quad (2.7)$$

де Δt_1 і Δt_2 - перепади температур в оболонці у першому і другому досліді;

$K_2(\omega_i)$ і $K_2\left(\frac{1}{\omega_i}\right)$ - зовнішня поверхня оболонки; коефіцієнти усереднювання теплового потоку при

$\omega_i = \frac{F}{F'}$ - відношення внутрішньої і зовнішньої поверхней оболонок;
нагріві оболонок ззовні і зсередини;

Метод балансу тепла в зразку полягає в тому, що зразок з невідомими теплофізичними властивостями поміщається в оболонку з відомими властивостями. Додатково вимірюється перепад температур у шарі досліджуваного матеріалу та середня температура матеріалу. Розрахункові формули для теплофізичних властивостей

$$C = \frac{\frac{\lambda_{об}}{S_{об}} F \tau_3 (\Delta t_{i+1}''' - \Delta t_{i+2}''') - \frac{1}{2} c_{об} t_{об} M_{об}}{tM}; \quad (2.8)$$

$$\lambda = \lambda_{об} \frac{\Delta t_{i+2}'''}{\Delta t_{i+1}'''} \cdot \frac{S_{об}}{\lambda_{об}} + \frac{ctM + \frac{1}{2} c_{об} t_{об} M_{об}}{\Delta t_{i+1}''' \tau_3} \cdot \frac{S}{2F}, \quad (2.9)$$

де S, t, M, τ_3 - час теплової дії у третьому досліді;
 S, t, M - товщина, температура і маса досліджуваного матеріалу;
 $\Delta t_{i+1}''', \Delta t_{i+2}'''$ - перепади температур у шарах оболонки і матеріалу у третьому досліді.

Метод балансу тепла, реалізований у плоскій оболонці, може бути застосований для дослідження теплофізичних властивостей тіл неправильної форми, у яких одна площина може бути оброблена. Для дисперсних матеріалів і зразків, що підлягають механічній обробці, рекомендовано використовувати циліндричну оболонку, властивості якої визначаються у двох тарувальних дослідіах, один з яких може провадитися на порожній оболонці. У тарувальних дослідіах визначаються комплекси А і Z, що містять теплофізичні властивості оболонки та її геометричні параметри

$$A = \frac{\lambda_{об}}{S_{об}} \cdot \frac{F'}{\frac{1}{K_2(\omega_i)} + \frac{1}{K_2\left(\frac{1}{\omega_i}\right)\omega_i}} = \frac{c_2 t_2 M_2}{\Delta t_2 \tau_2 - \Delta t_1 \tau_1}; \quad (2.10)$$

$$Z = \frac{C_{05} t_{05} M_{05}}{1 + \frac{K_2(\omega_i)}{K_2 \left(\frac{1}{\omega_i} \right) \omega_i}} = C_2 t_2 M_2 \frac{\Delta t_1 \tau_1}{\Delta t_2 \tau_2 - \Delta t_1 \tau_1} \quad (2.11)$$

У виразах (2.10) і (2.11) праворуч стоять тільки вимірні або відомі величини.

У робочому досліді визначаються теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу, який досліджується

$$C = \frac{A \Delta t_i \tau_3 - Z}{tM} \quad ; \quad (2.12)$$

$$\lambda = \frac{A \Delta t_i \tau_3 - Z}{\Delta t_{i+1} \tau_3} \cdot \frac{r_{i+1}}{K_2 F} \quad (2.13)$$

де $K_2 = 2$ - коефіцієнт усереднювання теплового потоку для суцільного циліндру.

Для всіх розглянутих методів визначення теплофізичних властивостей виконано аналіз можливих торцевих втрат оболонкою та матеріалом, що досліджується. Рекомендовано при використанні методу балансу тепла визначати кількість тепла, засвоєного оболонкою, у тарувальному досліді за методом оболонки. Це надає можливість врахувати втрати тепла як оболонкою, так і досліджуванім матеріалом. Якщо користуватися відомим значенням теплоємності оболонки, то потрібно оцінювати і враховувати втрати тепла оболонкою і матеріалом, для чого необхідно провадити додатковий дослід (нагрівання порожньої оболонки), або виконувати додаткове вимірювання перепаду температур на матеріалі з відомими властивостями в одному з дослідів. Коефіцієнт теплопровідності оболонки можна визначати заздалегідь за методом оболонки або користуватися його відомим значенням. В обох випадках немає необхідності в обліку втрат тепла.

Експериментальні дані з теплофізичних властивостей, що одержані з використанням розроблених методів оболонки і балансу тепла, добре узгоджуються з літературними. Крім того, методи ма-

ють ту безперечну перевагу, що дозволяють досліджувати теплофізичні властивості у комплексі, на одному зразку, за один експеримент та на зразках не тільки класичної форми.

Методи оболонки і балансу тепла дозволили більш строго обґрунтувати використання квазістационарного режиму для дослідження теплофізичних характеристик. Незважаючи на те, що використане вихідне рішення диференційного рівняння теплопровідності не передбачає залежності теплофізичних характеристик від температури, кожному знайденому значенню теплофізичних властивостей можна поставити у відповідність певну температуру, що дозволяє одержати залежність властивостей від температури.

Регулярний режим інтерпретований для тіл довільної форми при нагріві у розплавлених середовищах з різними температурами плавлення. Коефіцієнт форми кускових матеріалів при цьому визначається експериментально. Одержано емпіричні залежності коефіцієнту форми довільного тіла від відношення об'єму до поверхні тіла. Знайдено таке відношення об'єму до поверхні, при якому тіло довільної форми має такий же коефіцієнт форми, як і тіло правильної форми даного класу.

Якщо враховувати залежність теплофізичних властивостей від температури, то диференційне рівняння теплопровідності стає нелінійним. Визначення теплофізичних характеристик в рівняння теплопровідності за результатами вимірювання температурного поля у зразку, що досліджується, є об'єктом внутрішньої зворотної задачі теплопровідності. Рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a(t) \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (2.14)$$

вміщує тільки одну невідому величину - коефіцієнт температуропровідності, що залежить від температури.

У кінцево-різницевої апроксимації

$$\frac{t_{i+1,k} - t_{i,k}}{\Delta \tau} = a_{i,k} \left[\frac{t_{i,k-1} - 2t_{i,k} + t_{i,k+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{x_{i,k}} \cdot \frac{t_{i,k+1} - t_{i,k-1}}{2\Delta x} \right], \quad (2.15)$$

де $a_{i,k}$ - шуканий коефіцієнт температуропровідності, що визначається для середньомасової температури зразка.

$$\alpha_{i,k} = \frac{t_{i+1,k} - t_{i,k}}{\Delta \tau} \cdot \left(\frac{t_{i,k-1} - 2t_{i,k} + t_{i,k+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{x_{i,k}} \cdot \frac{t_{i,k+1} - t_{i,k-1}}{2\Delta x} \right) \quad (2.16)$$

Коефіцієнт теплопровідності знаходиться, якщо густина і залежність теплоємності від температури відомі

$$\lambda_{i,k} = \alpha_{i,k} \cdot \rho \cdot C_{i,k} \quad (2.17)$$

Одержаний розв'язок зворотної задачі теплопровідності було перевірено на вкладиші, яким користуються для ізоляції бічної поверхні додаткової частини зливу. Розрахунки виконано за методом балансу тепла та за отриманим рішенням. Практично повне співпадіння залежності коефіцієнту теплопровідності від температури, розрахованої за різними методиками, спостерігається в середині температурного інтервалу дослідження (480...590 °C). Розбіжність при низьких та високих температурах пояснюється визначенням похідних за експериментально виміряним температурним полем.

В більш складному випадку залежності теплоємності і коефіцієнту теплопровідності від температури

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{1}{x} \cdot \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2.18)$$

використовуючи лінійізуючу функцію

$$G = \int \lambda dt \quad (2.19)$$

отримаємо рівняння теплопровідності у вигляді

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial G}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \quad (2.20)$$

Прийнявши лінійні залежності теплофізичних властивостей від температури

$$\lambda_{i,k} = a + \beta t_{i,k} \quad (2.21)$$

$$c_{i,k} = c + d t_{i,k} \quad (2.22)$$

і, використавши метод кінцевих різниць, отримаємо

$$(c + dt_{i,k})\rho \frac{t_{i+1,k} - t_{i,k}}{\Delta\tau} = \frac{a(t_{i,k-1} - 2t_{i,k} + t_{i,k+1}) + \frac{\beta}{2}(t_{i,k-1}^2 - 2t_{i,k}^2 + t_{i,k+1}^2)}{\Delta X^2} + \frac{1}{X_{i,k}} \cdot \frac{t_{i,k+1} - t_{i,k-1}}{2\Delta X} (a + \beta t_{i,k}). \quad (2.23)$$

Це рівняння зміщує чотири невідомих коефіцієнта, для знаходження яких складаємо чотири рівняння типу (2.23) для різних моментів часу, коефіцієнти при невідомих a , b , c , d означаємо відповідно a_{i1} , a_{i2} , a_{i3} , a_{i4} , вільний член - b_i і отримуємо рівняння

$$a_{i1}a + a_{i2}b + a_{i3}c + a_{i4}d = b_i, \quad (2.24)$$

де

$$a_{i1} = - \left(\frac{t_{i,k-1} - 2t_{i,k} + t_{i,k+1}}{\Delta X^2} + \frac{1}{X_{i,k}} \cdot \frac{t_{i,k+1} - t_{i,k-1}}{2\Delta X} \right); \quad (2.25)$$

$$a_{i2} = - \left(\frac{t_{i,k-1}^2 - 2t_{i,k}^2 + t_{i,k+1}^2}{2\Delta X^2} + \frac{t_{i,k}}{X_{i,k}} \cdot \frac{t_{i,k+1} - t_{i,k-1}}{2\Delta X} \right); \quad (2.26)$$

$$a_{i3} = \rho \frac{t_{i+1,k} - t_{i,k}}{\Delta\tau}; \quad (2.27)$$

$$a_{i4} = \rho t_{i,k} \frac{t_{i+1,k} - t_{i,k}}{\Delta\tau} \quad (2.28)$$

$$b_i = 0. \quad (2.29)$$

Рішення одержаної системи рівнянь зводиться до знаходження власних значень матриці четвертого порядку.

Перевага цього рішення зворотної задачі теплопровідності полягає в тому, що у результаті рішення виходить аналітична залежність теплоємності та коефіцієнту теплопровідності від темпе-

ратури у вигляді поліному будь-якого ступеню.

Це рішення внутрішньої зворотної задачі теплопровідності відноситься до неекстремального методу обернення моделі з попереднім спрощенням шляхом застосування лінійізуючої підстановки.

3. УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

На базі розроблених методів створено комплекс дослідницького обладнання для визначення теплофізичних властивостей дисперсних і суцільних матеріалів, у тому числі довідльної форми. Установки працюють у нестационарних режимах: регулярному та квазістационарному.

Установку для визначення теплофізичних властивостей матеріалів довідльної форми (ВТЕМ-ПФ) створено на базі методу балансу тепла. Вона працює у квазістационарному режимі, що забезпечується нагрівом сталим тепловим потоком. Зразок вміщується в оболонку у формі плоского паралелепіпеду та обігривається знизу. Силовa схема забезпечує плавне регулювання та вимірювання потужності установки. Вимірювальна схема передбачає вимірювання перепадів температур у зразку та оболонці, а також середньої температури плоского шару зразка. Для підвищення точності вимірювання виконуються диференціальним засобом.

Вперше виконані на установці ВТЕМ-ПФ дослідження теплофізичних властивостей гарнісажу доменних печей показали можливість її застосування для вимірювання ентальпії, теплоємності та коефіцієнту теплопровідності матеріалів у вигляді кусків неправильної форми.

Для вимірювання коефіцієнту температуропровідності кускових матеріалів за методом регулярного режиму створено установку ВТЕМ-РР, що складається з електричної печі регульованої потужності, змонтованої у циліндричному корпусі з надійною тепловою ізоляцією. Для безпечної роботи з розплавами зверху корпус зашлюнений оглядовим склом, крізь яке пропущено натискний пристрій, за допомогою якого зразок занурюється в розплав і затримується там.

Вимірювальна схема установки забезпечує контроль температури розплаву та різниці температур між розплавом і зразком, яка записується автоматичним швидкісним потенціометром.

Установка для визначення теплофізичних властивостей матеріалів (ВТЕМ-1) працює у квазістаціонарному режимі та дозволяє досліджувати дисперсні та суцільні матеріали циліндричної форми в інтервалі температур 100...1100 °С. Установка призначена для визначення всього комплексу теплофізичних характеристик за один дослід. Досліджуваний зразок вміщується у циліндричну оболонку та встановлюється всередині робочого простору електричної печі, потужність якої регулюється.

Вимірювальна схема установки забезпечує вимірювання температури поверхні зразка та перепадів температур по перерізу зразка і в стінці оболонки. Більшу частину матеріалів металургійного виробництва було досліджено на цій установці.

Установки для визначення теплофізичних властивостей матеріалів використовуються в науково-дослідних інститутах і спеціалізованих підрозділах, а також широко впроваджені у навчальний процес. У дослідженнях беруть участь аспіранти та студенти.

4. ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ТЕПЛОФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Вимірювання теплофізичних характеристик у нестационарному режимі пов'язане з вимірюванням температурного поля зразка. Тому підвищення точності теплофізичного експерименту може бути досягнуто за рахунок підвищення точності вимірювання температури. Треба мати на увазі, що чим більше опосередковано вимірювання теплофізичних характеристик (чим складніше методика обробки експериментальних даних), тим більше похибка вимірювання.

Оцінку точності вимірювання теплофізичних характеристик за різними методиками було зроблено шляхом визначення випадкової помилки вимірювання перепаду температур за 480 дослідями та порівняння її з систематичною помилкою. Встановлено, що з похибкою в 25 % сумарна помилка вимірювань визначається систематичною.

Аналіз результатів визначення похибок за різними методиками вимірювання теплофізичних властивостей довів, що незалежно, безпосереднє визначення теплофізичних властивостей знижує похибку. Так, вимірювання коефіцієнту температуропровідності за методом регулярного режиму (безпосередньо) може бути проведено з похибкою 2,83 %, а за суміщеною методикою сталого теплового потоку і квазістаціонарного режиму - з похибкою 7,13 %. Метод балансу:

тепла дозволяє визначити ентальпії з похибкою 3,06 %, теплоємність - 3,06 %, коефіцієнт теплопровідності - 3,72 %. Необхідно зазначити, що це цілком достатня точність для технічного застосування.

Щодо похибки визначення температурної залежності теплофізичних характеристик матеріалів за розв'язком зворотної задачі теплопровідності, то вона складає для теплоємності 8,40 %, для коефіцієнту теплопровідності - 8,41 % та визначається похибкою знаходження просторових похідних температури.

Б. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТІЛ ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ

На установці регулярного режиму (ВТЕМ-РР) вперше виконано вимірювання коефіцієнту температуропровідності формованого коксу і гарнісажу доменних печей, які належать до матеріалів, що практично не піддаються механічній обробці, в зв'язку з чим немає можливості надати їм класичної форми. Дослідження умов утворення і плавлення гарнісажу та регулювання його товщини не можливо без знання теплофізичних властивостей, чим і зумовлена необхідність постановки цих досліджень.

Коефіцієнт форми довірливих кусків визначався на їх моделях, виготовлених з парафіну. При визначенні коефіцієнту температуропровідності безпосередньо вимірювався темп нагрівання за допомогою автоматичного запису в часі різниці температур між гріючим розплавом і зразком. Для розширення температурного інтервалу досліджень застосовано попереднє підігрівання зразків до температури 200...300 °С. В якості гріючого середовища з метою визначення температурної залежності послідовно застосовувалися розплави з різними температурами плавлення. Діаграми запису перепаду температур між розплавом і зразком у часі подавалися в подюлогарифмічній анаморфозі. Температура середньої ізотерми, до якої відносились одержані дані, обчислювалась на ЕОМ.

Для визначення ентальпії і теплоємності використовувався метод балансу тепла та установка ВТЕМ-1.

В результаті виконаних досліджень показано, що для доменно-го коксу правильної та довірливої форми залежність коефіцієнту температуропровідності від температури описується одним і тим же рівнянням, що підтверджує правомірність застосування цієї мето-

дики для дослідження кускових матеріалів довільної форми. Крім того, одержано унікальну інформацію з теплофізичних властивостей доменного гарнісажу, яку використано для розв'язання важливої задачі металургійного виробництва - дослідження динаміки плавлення та створення гарнісажного шару.

6. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СКЛАДНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Математичне планування експерименту в сполученні з дослідженням теплофізичних властивостей складних матеріалів (сумішей) дозволяє одержати значно більше достовірної інформації, ніж традиційний теплофізичний експеримент. В роботі використано симплекс-гранчасте планування (метод А. Шеффе), що дозволяє знайти залежність теплофізичних властивостей матеріалів від їхнього складу. Для включення в моделі температури використано метод прямих добутоків. Геометричною інтерпретацією моделей є діаграми "склад - властивість" для різних температур, які дозволяють прогнозувати теплофізичні властивості матеріалів у залежності від складу і вибрати компонентний склад сумішей з заданими теплофізичними властивостями. Таким засобом досліджено дисперсний піношамот, що складається з трьох фракцій, знайдено склад низькотеплоємної шихти силікомарганцю і досліджено властивості рудно-вугільних сумішей з полімерною домішкою в локальній області "псевдокомпонентів" системи.

Для дисперсного піношамоту знайдена модель коефіцієнту теплопровідності, Вт/м.град

$$\lambda = 0,554X_1 + 0,422X_2 + 0,432X_3 - 0,088X_1X_2 + 0,136X_1X_3 + 0,196X_2X_3 + 0,21 \cdot 10^{-3} X_1t + 0,047 \cdot 10^{-3} X_2t - 0,07 \cdot 10^{-3} X_3t + 0,846 \cdot 10^{-3} X_1X_2t + 0,112 \cdot 10^{-3} X_1X_3t + 0,526 \cdot 10^{-3} X_2X_3t, \quad (6.1)$$

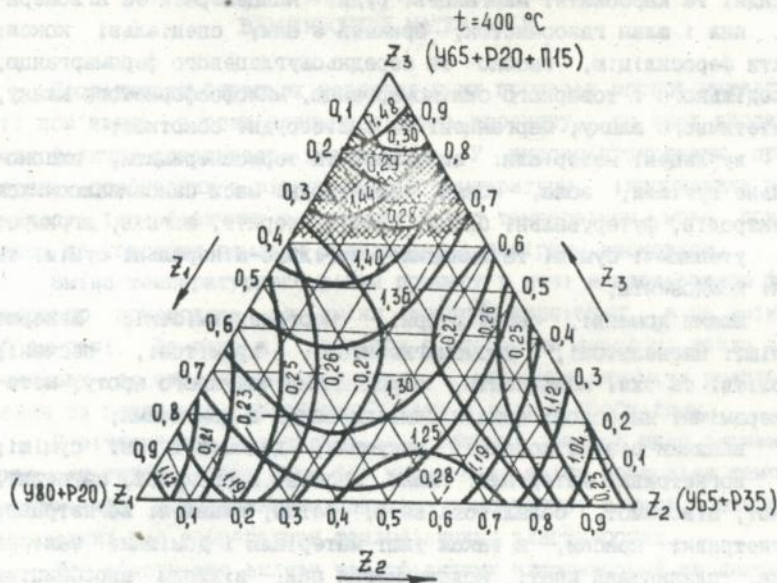
яка може бути використана для оцінки теплофізичних властивостей інших дисперсних матеріалів, тому що внесок теплопровідності твердої фази складає тільки 10...15 %. Одержано також моделі залежності насипної та уявної густини та пористості від складу.

В результаті дослідження властивостей шихти силікомарганцю в тому числі одержано модель залежності ентальпії від температури та складу, кДж/кг

$$j = 0,303X_1t + 0,369X_2t + 1,167X_3t - 0,344X_1X_2t - 2,224X_1X_3t - 2,048X_2X_3t + 0,473 \cdot 10^{-3} X_1t + 0,224 \cdot 10^{-3} X_2t - 0,244 \cdot 10^{-3} X_3t + 0,77 \cdot 10^{-3} X_1X_2t + 1,594 \cdot 10^{-3} X_1X_3t + 1,852 \cdot 10^{-3} X_2X_3t, \quad (6.2)$$

дослідження якої у вигляді діаграми "склад - властивість" дозволило рекомендувати такий склад шихти: кокс - 15...20 %, кварцит - 45...15 %, малофосфористий шлак - 40...65 %.

На мал. 6.1 наведено графічну інтерпретацію теплофізичних властивостей рудно-вугільних сумішей з полімерною домішкою.



Мал. 6.1. Графічна інтерпретація компромісно-оптимальної області теплофізичних властивостей рудно-вугільної суміші з домішкою полімеру

Заштрихована область зі складом полімеру 10,5...15,0 % відповідає компромісно-оптимальній області властивостей суміші:
 $\lambda_{\text{max}} = 0,28...0,30$ Вт/м.град; $C_{\text{max}} = 1,38...1,48$ кДж/кг.град.

Встановлено, що домішка полімеру збільшує ефективність і поліпшує якість спікання рудно-вугільних сумішей. Останнє обумовлено збільшенням коефіцієнту теплопровідності разом зі збіль-

шенням кількості відходів термoplastів у суміші.

7. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Досліджено теплофізичні властивості в залежності від температури (100...1100 °С) матеріалів, що застосовуються в металургійному виробництві:

у феросплавному виробництві: природні марганцеві мінерали, оксидні та карбонатні марганцеві руди, концентрати та агломерати, пил і шлам газоочисток, брикети з них; спеціальні кокси; шихти феросиліцію, високо- та середньовуглецевого феромарганцю, передільного і товарного силікомарганцю, малофосфористого шлаку, синтетичного шлаку; марганцеві та залізородні обкотиші;

вуглецеві матеріали: антрацити та термоантрацити, високозольне вугілля, зола, кокси, електродні маси самовипалюючихся електродів, футерувальні блоки, графіт, перліт, лігнін, агримус; утеплючі суміші та вкладиші, вугільно-мінеральні суміші та їхні компоненти;

шлаки доменні, конверторні, марганецьвмісткі; ливарні суміші: магнезитові, хромомагнезитові, хромітові, песчані, перлітні та їхні компоненти, з домішками чавунного шроту, металокерамічні на основі алюмінієвих порошоків з домішками;

вапняки різних копалин: ракушняк, доломіт і їхні суміші;

вогнетривкі матеріали: глина, каолін, вермикуліт, магнезит, шамот, піношамот, базальтова вата, бетон, плавлені вогнетриви, вогнетривкі краски, а також інші матеріали і домішки: залізна руда, плавиковий шпат, колошниковий пил, відходи виробництва високоглиноземистого алюмінію та коксохімічних заводів, мідь, чавунний шріт, силікомарганець, емалева фрита.

Дослідження теплофізичних властивостей матеріалів виконано у чотирьох напрямках:

одержано дані в теплофізичних властивостей нових або раніше не досліджених матеріалів. Ці результати використані при проектуванні УкрДіпрометом, інститутом Волгограддіпробіосинтеза, Санкт-Петербурзьким НВО "Пігмент";

знайдено склади низькотеплоємних шихт, не вдаючись до дорогого промислового експерименту. Їхнє застосування дозволяє заощаджувати тепло та електроенергію;

знайдено шляхи повернення відходів у технологічні процеси та їх застосування в якості заміників дефіцитних матеріалів. Це дає економію матеріальних ресурсів і поліпшення навколишнього середовища;

знайдено матеріали з заданими або новими теплофізичними властивостями (металевонаповнені ливарні суміші, нетрадиційні домішки).

8. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

Дослідження багатьох технологічних процесів чорної металургії пов'язане з розв'язанням рівнянь переносу, до яких входять теплофізичні властивості матеріалів. У високоінтенсивних процесах, пов'язаних з різкою зміною температури, ігнорування залежності теплофізичних властивостей від температури може призвести до істотних помилок результату і невірним висновкам.

Зміна температурного рівня процесу в печі з гарнісажною футеровкою призводить до зміни товщини гарнісажу, а це змінює об'єм печі. До того ж, гарнісаж є елементом передачі тепла від розплаву до охолоджувальної води, і вивчення динаміки розплавлення та створення гарнісажного шару є вельми необхідним.

У літературі розглядаються спрощені задачі щодо вивчення динаміки гарнісажного шару без урахування зміни розподілу температури або з урахуванням динаміки температури в шарі, але при незалежних від температури теплофізичних властивостях.

Для в'ясування впливу теплофізичних властивостей на динаміку гарнісажного шару на ЕОМ реалізовано розрахунок із змінним коефіцієнтом теплопровідності по рівнянню, яке не враховує динаміку температури в шарі. Установлено, що з підвищенням коефіцієнту теплопровідності в шарі час переходу межі шару до нового стаціонарного стану зменшується, проте навіть при великих значеннях коефіцієнту теплопровідності ($\lambda = 33$ Вт/м.град) час переходу є значним і складає біля 5 годин при товщині шару 0,3 м.

Для обліку залежності динаміки температури в шарі та залежності теплофізичних властивостей гарнісажу від температури аналітично розв'язано диференціальне рівняння теплопровідності. З цією метою рівняння лінійаризувалось, а потім до нього застосову-

валось інтегральне перетворення Лапласа з наступною підстановкою значення градієнту температури на межі тверда фаза - розплав у рівняння балансу тепла на межі. Оскільки рішення одержано у диференційному вигляді, до нього застосовано метод кінцевих різниць з реалізацією ітераційного розрахункового процесу.

Паралельно метод кінцевих різниць застосовувався безпосередньо до вихідних рівнянь. Рівняння теплопровідності в твердій фазі записувалось у кінцево-різницевої формі і розв'язувалось разом з рівнянням балансу тепла на межі тверда фаза - розплав. Динаміка температури у твердому залишку розраховувалась з використанням закономірностей сітки зі змінним у часі числом шарів. Обидва рішення дали практично співпадаючі результати при розрахунку плавлення та створення гарнісажного шару при змінненні температури розплаву на 50 °С.

Методика розрахунку плавлення та створення гарнісажного шару може бути використана для створення раціонального алгоритму контролю та керування тепловим станом печей з гарнісажною футеровкою.

Однією з актуальних задач сталеплавильного виробництва є зменшення головної обрізі зливку. Поставлену задачу треба віднести до теплофізичного засобу поліпшення якості злиwkів і збільшення виходу придатного металу при розливці сталі.

Невідповідність швидкості кристалізації металу у верхній частині зливку процесу загальної усадки металу є головною причиною формування у тілі зливка глибокої та вузької усадочної раковини та області пухкого металу біля неї, бо при фазовому переході від рідкого стану до твердого об'єм зливка зменшується на 3...5%. Зменшення цих дефектів можливо лише при умові керування швидкістю твердіння металу в головній частині зливка. Одним із засобів підвищення виходу придатного металу є використання додаткових надставок, футерованих шамотною цеглою, а також теплоізолюючих засипок дзеркала металу у додатку.

Більш ефективним шляхом зниження головної обрізі при розливці сталі у зливки є теплоізоляція бічної поверхні верхньої частини зливку теплоізолюючими вкладищами з одночасною теплоізоляцією дзеркала металу. Таке комбіноване утеплення перерозподіляє теплові потоки в додатковій частині зливку в залежності від теплофізичних властивостей засипки та вкладищу. У зв'язку з цим було поставлено задачу визначення такого сполучення засипки і

вкладу, використання якого призводить до мінімальної висоти усадочної раковини, та, отже, мінімальної обрізі головної частини аливку. Розрахунки виконувалися на ЕОМ за програмою, розробленою О.Д. Горбуновим. Крім параметрів усадочної раковини визначався розподіл температур у системі "аливок - виливниця", положення фронтів твердіння в будь-який час і повний час твердіння. У результаті знайдено оптимальний варіант сполучення засипки та утеплюючого вкладу: перлітно-вуглецева утеплююча суміш і вкладиш на основі дунитового піску, застосування яких дозволяє знизити масу обрізі аливку до 8 %, що на 1,6 % краще досягнутого показника з використанням традиційної технології.

Головні результати дисертаційної роботи впроваджені на Павлоградському заводі стінових матеріалів, Дніпропетровському металургійному заводі ім. Петровського, Зестафонському заводі феросплавів ім. Г. Николаєва, використані Укрдипромеазом, Волгоградським інститутом "Діпробіосинтез", Санкт-Петербурзьким НВО "Пігмент" для проектування.

Реальний економічний ефект склав 1297 тис. крб. на рік (у цінах 1991 р.).

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

1. Одержано нове рішення внутрішньої зворотної задачі теплопровідності з урахуванням залежності теплофізичних властивостей від температури.

Розроблено нові методи дослідження теплофізичних властивостей матеріалів: метод оболонки, який дозволяє визначати теплофізичні властивості матеріалів на зраках у формі плоскої, циліндричної або сферичної оболонки; метод балансу тепла, який дозволяє визначати комплекс теплофізичних властивостей матеріалів, вміщених в оболонку з відомими теплофізичними властивостями; метод регулярного режиму, який дозволяє визначати коефіцієнт температуропровідності для кускових матеріалів довільної форми.

2. Створено комплекс дослідницького устаткування, який дозволяє визначати теплофізичні властивості дисперсних і суцільних матеріалів на зраках у формі циліндру, а також кускових матеріалів довільної форми.

3. Розроблені методики та дослідницьке обладнання дозволя-

ють дістати досить високу точність дослідження властивостей.

4. Дослідження теплофізичних властивостей доменного гарнісажу та коксу у вигляді кусків довільної форми, що виконані на установках ВТЕМ-РР і ВТЕМ-1, свідчать про правомірність застосування даної методики щодо дослідження тіл довільної форми.

5. Дослідження теплофізичних властивостей складних матеріалів виконано в сполученні з плануванням експерименту, що дозволило дістати обширну інформацію про залежність властивостей від складу і температури у вигляді математичних моделей, геометричною інтерпретацією яких є діаграми "склад - властивість". Таким засобом досліджено дисперсний піношамот, знайдено склад низькотеплоємної шихти силікомарганцю і досліджено рудно-вугільні суміші з полімерною домішкою. Для них виявлено теплофізичні властивості, що найбільш суттєво впливають на інтенсивність процесу коксування та якість готового продукту.

6. Одержано значну за обсягом та в багатьох випадках нову інформацію з теплофізичних властивостей матеріалів металургійного виробництва. Досліджено: марганецьвмістка сировина, шихти, шлаки та спеціальні кокси феросплавного виробництва, марганцеві та залізорудні обкотиші, рідноманітні вуглецеві матеріали та їхні суміші з іншими матеріалами, доменні, конверторні та синтетичні шлаки, ливарні суміші, вапняки, вапно та вогнетривкі матеріали в інтервалі температур 100...1100 °С. Одержано рівняння залежності теплофізичних властивостей від температури.

7. Результати дослідження теплофізичних властивостей матеріалів використано при проектуванні ряду технологічних установок у чорній металургії та інших галузях промисловості.

8. У результаті дослідження теплофізичних властивостей шихтових матеріалів металургійного виробництва знайдено склад низькотеплоємних шихт, застосування яких дозволяє заощаджувати тепло, електроенергію та інші матеріальні та енергетичні ресурси.

9. Одержано рішення актуальних задач металургійного виробництва: динаміки плавлення та створення гарнісажного шару з урахуванням розподілу температури в шарі гарнісажу і залежності теплофізичних властивостей від температури; знайдено оптимальне сполучення теплоізолюючих матеріалів додаткової надставки виливниці. Застосування перлітно-вуглецевої суміші для ізолювання дзеркала металу і вкладиша на основі дунітового піску для ізоляції бічної поверхні додаткової надставки дозволяє зменшити

висоту усадочної раковини і знизити масу обрізі аливка, тим самим підвищивши вихід готового металу.

Основний зміст дисертації викладений в роботах:

1. Ильченко К.Д. Исследование теплофизических характеристик некоторых дисперсных материалов//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб.-Киев: Техника, 1970.-Вып.21.-С. 82 - 85.
2. Розенгарт Ю.И., Ильченко К.Д. Определение теплофизических свойств материалов на основе баланса тепла//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 1971. - Вып.26.- С. 31 - 34.
3. Ильченко К.Д., Крючков Е.Н. Исследование теплофизических характеристик кокса для засыпки электродов//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб.-Киев: Техника, 1972.-Вып.31.- С. 81 - 83.
4. Исследование теплофизических свойств кусковых материалов/ К.Д. Ильченко, Ю.И. Розенгарт, В.С. Шерман и др.//Известия вузов. Черная металлургия.- 1974.- N 6.- С. 37 - 40.
5. Ильченко К.Д., Розенгарт Ю.И., Нестеренко Л.П. Исследование теплофизических свойств специальных видов кокса//Кокс и химия.- 1974.- N 6.- С. 24 - 27.
6. Одинцов В.А., Ильченко К.Д., Гусев А.А. Теплофизические свойства шихт для выплавки синтетических шлаков//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб.- Киев: Техника, 1976.- Вып.49.- С. 79 - 83.
7. Ильченко К.Д. Номограмма для определения приведенного коэффициента излучения//Металлургическая и горнорудная промышленность: Науч.-техн. и производственный сб.- 1976.- N 3.- С. 41-42.
8. Ильченко К.Д., Розенгарт Ю.И., Злыдина А.П. Исследование теплофизических свойств дисперсного материала с помощью планирования эксперимента//Известия вузов. Черная металлургия.- 1977.- N 2.- С. 148 - 152.
9. Ильченко К.Д., Розенгарт Ю.И., Берман Р.Л. Исследование теплофизических свойств доменных гарниссажей//Металлургическая и горнорудная промышленность: Науч.-техн. и производственный сб.- 1979.- N 1.- С. 38 - 39.
10. Ильченко К.Д., Розенгарт Ю.И. Установка для исследования

теплофизических свойств дисперсных материалов//Механика сыпучих материалов: Теа. докл. IV Всесоюз. конф. - Одесса: Б.И., 1980. - С. 279.

11. Исследование теплофизических свойств электродных масс с карбидсодержащими добавками/В.В. Кашкуль, В.Ф. Лысенко, К.Д. Ильченко и др.//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 1981. - Вып. 74. - С. 72 - 75.

12. Ильченко К.Д., Розенгарт Ю.И. Исследование динамики плавления и образования гарниссажа//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 1982. - С. 93 - 97.

13. Исследование тепло- и электрофизических характеристик углеродистых материалов, применяемых в рудной электротермии/Л.И. Анелок, В.В. Гальперн, К.Д. Ильченко и др.//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 1983. - Вып. 81. - С. 93 - 97.

14. Исследование теплофизических характеристик электродов и футеровки печей цветной металлургии/Л.И. Анелок, В.В. Кашкуль, К.Д. Ильченко и др.//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 1984. - Вып. 85. - С. 89 - 95.

15. Кучер А.Г., Ильченко К.Д. Исследование теплофизических свойств марганцевых минералов, шихтовых материалов и шихт для выплавки марганцевых ферросплавов//Известия вузов. Черная металлургия. - 1984. - N 10. - С. 39 - 44.

16. Ильченко К.Д., Золотко Е.П. Исследование теплофизических свойств доменных шлаков//Сталь. - 1985. - N 4. - С. 10 - 11.

17. Ильченко К.Д., Бошнякова М.В., Егоров В.М. Исследование теплофизических свойств многокомпонентных углеродистых материалов с помощью планирования эксперимента. - Киев, 1985. - 52. - Деп. в УкрНИИТИ 23.07.85, N 1507.

18. Ильченко К.Д., Кучер А.Г. Исследование теплофизических свойств шихтовых материалов и шихт для выплавки марганцевых ферросплавов//Физико-химические исследования малоотходных процессов в электротермии. - М.: Наука, 1985. - С. 52 - 57.

19. Изучение теплопроводности углеродсодержащих теплоизолирующих материалов/Ю.И. Розенгарт., К.Д. Ильченко., Н.И. Виниченко и др.//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 1986. - Вып. 90. - С. 101 - 103.

20. Ильченко К.Д., Розенгарт Ю.И., Орехова Г.А. Исследование влияния теплофизических свойств на качество литейных смесей//

Промышленная теплотехника. - 1986. - N 5. - С. 50-53.

21. Теплофизические свойства смесей из растительных материалов для изоляции зеркала металла/К.Д. Ильченко, Ю.И. Розенгарт, Н.И. Виниченко и др.//Сталь. - 1986. - N 12. - С. 36-39.

22. Применение планирования эксперимента при исследовании теплофизических свойств угольных смесей в процессе нагрева/ К.Д. Ильченко, Ю.И. Розенгарт, М.Б. Бошнякова и др.//Известия вузов. Черная металлургия. - 1987. - N 1. - С. 124 - 128.

23. Егоров В.М., Гончаров В.Ф., Ильченко К.Д. О механизме снижения прочности спекания смесей углей с рудными концентратами//Химия твердого топлива. - 1987. - N 2. - С. 103 - 111.

24. Золотько Е.П., Бовкун К.А., Ильченко К.Д. Проблемы и перспективы эффективного использования физической теплоты жидкого доменного шлака//Проблемы энергетики теплотехнологии: Тез. докл. II Всесоюз. науч. конф. - М.: МЭИ, 1987. - С. 24.

25. Теплофизические свойства концентратов обжиг-гравитационного обогащения Чиатурских карбонатных марганцевых руд и шихт среднеуглеродистого ферромарганца/С.М. Маамшвили, Н.И. Церетели, К.Н. Церетели, К.Д. Ильченко//Марганец. Добыча, обогащение и переработка: Науч.-техн. реф. сб. - Тбилиси: Б.И., 1987. - 4(12). - С. 29 - 31.

26. Ильченко К.Д., Кучер А.Г., Морозенко Е.П. Исследование теплофизических свойств шихтовых материалов ферросплавного производства//Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Киев: Техника, 1988. - Вып. 97. - С. 107 - 110.

27. Ильченко К.Д., Морозенко Е.П. Применение метода конечных разностей к решению обратной задачи теплопроводности//Моделирование в инженерной практике: Тез. докл. зональной науч.-техн. конф. - Ижевск: Б.И., 1988. - С. 9 - 10.

28. Ильченко К.Д., Морозенко Е.П. Численный метод обработки результатов теплофизического эксперимента//Теория и практика тепловой работы металлургических печей: Тез. докл. Респ. конф. - Днепропетровск: ДМетИ, 1988. - С. 19.

29. Теплофизические свойства новых шихтовых материалов и шихт для выплавки ферромарганца/К.Д. Ильченко, Е.П. Морозенко, С.М.Маамшвили и др.//Известия вузов. Черная металлургия. - 1989. - N 8. - С. 31 - 33.

30. Ильченко К.Д., Морозенко Е.П., Педай И.И. Исследование теплофизических свойств известняков//Сталь. - 1989. - N 11. - С. 47

31. Ильченко К.Д., Кучер А.Г., Мороевко Е.П. Влияние теплофизических свойств агломератов на технико-экономические показатели выплавки ферромарганца//Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в черной металлургии: Теа. докл.Респ.науч.-техн.конф.-Днепропетровск, ДМети, 1989.- С. 154.

32. Оптимизация состава термкомпонентных шихт с помощью планирования эксперимента//Ю.И. Ровенгарт., К.Д. Ильченко., Е.П. Мороевко и др.//Известия вузов. Черная металлургия.- 1990.- N 5.- С. 36 - 37.

33. А.Кучер, К.Ильченко. Исследование теплофизических свойств мономинеральных руд марганцевых руд, шихтовых материалов и шихт для выплавки марганцевых ферросплавов//Новые и усовершенствованные технологии для окускования сырья и производства чугуна и ферросплавов: Резюме национальной науч.-техн. конф. с международным участием.- НР Болгария, Варна: МДУ им. Ф.Ж.Кюри, 1990.- С. 101 - 102.

34. Теплофизические свойства некоторых марганецсодержащих материалов и шихт на их основе/С.М. Маамизвили., В.А. Симонгулашвили, Т.Я. Мchedлидзе, К.Д. Ильченко//Марганец. Добыча, обогащение и переработка: Науч.-техн. реф. сб.- Тбилиси: Б.И., 1990.- 2(128).- С. 26 - 29.

35. Ильченко К.Д., Литвинов Е.В. Исследование теплофизических свойств конвертерных шлаков//Сталь.- 1991.- N 2.- С. 89 - 91.

36. Ильченко К.Д., Соколовская И.В. Исследование теплофизических свойств углеродистых восстановителей для ферросплавного производства// Кокс и химия.- 1991.- N 2.- С. 15 - 17.

37. Ильченко К.Д. Использование конвертерных и ферросплавных шлаков в доменном производстве//Интенсивное энергосбережение в промышленной теплотехнике: Теа. докл. 3-й Всесоюа. науч. конф. по проблемам энергетики и теплотехнологии.- М.: МЭИ, 1991.- С. 30.

38. Ильченко К.Д., Влнчиченко Н.И., Андрейченко И.Ю. Исследование теплофизических свойств теплоизолирующих вкладышей, применяемых при рааливке стали//Проблемы металлургического производства: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Киев: Тахника, 1991.- Вып. 196.- С. 116 - 125.

39. Ильченко К.Д., Водин И.И. Исследование теплофизических

свойств шихтовых компонентов и шихт для выплавки малофосфористого шлака//Сталь.- 1992.- № 5.- С. 42 - 44.

40. Смесь для приготовления металлокерамических форм: Положительное решение по заявке на а.с. № 4951880/02 (056191)/О.П.Осипова, Н.Г. Храмова, К.Д. Ильченко и др. (СССР).- 9 с.

A large, stylized handwritten signature or set of initials in dark ink, located in the upper middle section of the page. The signature is cursive and somewhat abstract, with a long vertical stroke extending downwards.

458576

AB 30.685

AB 30.685