

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

ДНІПРОДЗЕРЖИНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

---

На правах рукопису



ПАВЛЮЧЕНКОВ Ігор Олександрович

**ТЕОРІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ПЛАВЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ  
ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ**

Спеціальність - 05.16.02. - "Металургія чорних металів"

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпродзержинськ  
1995

009.1/8

НВ 33.555

Дисертація

ЛННБ України ім.В.Стефаніка

Робота



Дніпродзержинському державному технічному університету

00761609 (Т)

Науковий консультант:

заслужений діяч науки і техніки України,  
академік АІН України,  
доктор технічних наук, професор  
ОГУРЦОВ А.П.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор  
ГОРБУНОВ О.Д.;

доктор технічних наук, професор  
НЕДОПЬОКІН Ф.В.;

доктор технічних наук, професор  
ОЛЬШАНСЬКИЙ В.М.

Ведуче підприємство:

ДКМК "Криворіжсталь", м. Кривий Ріг.

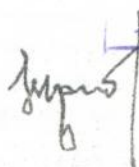
Захист відбудеться "26" грудня 1995р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої ради Д-37.01.01 при Дніпродзержинському державному технічному університеті за адресою: 322618, м. Дніпродзержинськ, вул. Дніпробудівська, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Дніпродзержинського державного технічного університету.

Автореферат розіслано "24" листопада 1995 року.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Вчений секретар  
спеціалізованої ради,  
доктор технічних наук, професор

 Чернов М.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Об'ємом виробництва металу, котре споживає велику кількість енергії і матеріальних ресурсів, в значній мірі визначається рівень розвитку економіки держави. Останнім часом для вирішення проблеми ефективного використання сировинних та енергетичних ресурсів при виробництві сталі впроваджено нові технологічні операції виплавки металу в дуговій сталеплавильній печі, в кисневому конвертері, при позапічній обробці сталі, а також під час розливки в виливницю та на машинах безперервного лиття заготовок.

Невід'ємною часткою вказаних операцій є стадія плавлення твердих матеріалів в рідкому розплаві. Висока температура, непрозорість та агресивність рідкого металу, а також коштовність натурних експериментів не дозволяє достатньо ефективно в промислових умовах відслідити кінетичні закономірності плавлення матеріалів. Тому для вивчення вказаних процесів перевага віддається методам моделювання.

Бурний розвиток обчислювальної техніки (особливо персональних ЕОМ), а також розробка нових ефективних математичних методів дають можливість побудувати адекватну реальному процесу математичну модель плавлення матеріалів і дістати більш повні та точні результати досліджень. Перехід від математичної моделі процесів тепломасопереносу до її чисельного алгоритму, котрий реалізується за допомогою ЕОМ, на даний час, найчастіше, здійснюється з застосуванням методу кінцевих різниць.

Мета роботи. Розробити математичні моделі та алгоритми розрахунків процесу плавлення матеріалів під час створення та освоєння нових технологій сталеплавильного виробництва; дослідити методами математичного моделювання в цих технологіях раціональні технологічні режими виробництва сталі.

Наукова новизна результатів роботи:

1. Розроблено алгоритми розрахунку, на основі методу Дюзінбера, кінетики нагріву та плавлення легкоплавких, тугоплавких та дифузійного плавлення понадтугоплавких тіл в розплаві. Під час розрахунку плавлення матеріалів враховуються тепловий період (намерзання та наступне плавлення оболонки розплаву), залежність теплофізичних параметрів від температури, тепловий ефект від взаємодії поверхні тіла та розплаву, а також можливе повторне намерзання оболонки розплаву.

2. Вперше розроблено математичні моделі та алгоритми розрахунку кінетики плавлення матеріалів для нових технологічних процесів в технологічній низці виробництва сталі:

- процесу плавлення у киснево-конвертерній ванні преспакетів однакової маси з подовжніми отворами різних діаметрів;
- динаміки нагріву та плавлення шихти в дуговій сталеплавильній печі (ДСП) з урахуванням залишаемого металу від попередньої плавки;
- формування рафінуючого шлаку з кускових твердих шлакостворюючих компонентів (вапна та плавикового шпату) за умов випуску металу з сталеплавильного агрегату у сталерозливний ківш;
- процесу плавлення чушкового алюмінію в процесі витримки та продувки металу у сталерозливному ковші;
- кінетики плавлення, руху та наступного конвективного масопереносу (усереднення) рідкої фази кускових матеріалів в процесі випуску металу з агрегату в сталерозливний ківш (з урахуванням гідродинаміки розплаву);
- кінетики плавлення порошкового дроту в металевій оболонці під час витримки металу у сталерозливному ковші;
- кінетики плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка під час витримки металу у сталерозливному ковші з урахуванням продувки аргонном через осьовий отвір зливка;
- кінетики плавлення кускових матеріалів у рідкій сталі під час введення їх у центрову сифонної розливки сталі;
- кінетики плавлення алюмінієвого дроту у металевій оболонці, котрий вводиться у кристалізатор МБЛЗ.

3. Розроблено програми розрахунку на алгоритмічній мові "Паскаль" та проведено чисельні експерименти на IBM -сумісних ПЕОМ для всіх розглядаємих в дисертаційній роботі алгоритмів розрахунків кінетики плавлення матеріалів.

Практична цінність та впровадження результатів роботи в промисловість. На підставі розроблених математичних моделей викладено основні висновки щодо кінетичних закономірностей нагріву та плавлення шихти у кисневому конвертері. Зроблено рекомендації щодо оптимальної маси "болота" під час виплавки сталі у 100-тонній дуговій сталеплавильній печі. Надано рекомендації щодо раціонального фракційного складу титановміщуючих феросплавів, гранульованого алюмінію та компонентів твердої шлакостворюючої суміші, котрі застосовуються при мікролегуванні, розкисленні та формуванні шлаку в процесі випуску металу з конвертера у сталерозливний ківш. Надано рекомендації щодо раціональної швидкості вводу порошкового дроту у ковші великої місткості.

Крім того, надано рекомендації щодо раціонального фракційного складу рідкоземельних кускових матеріалів під час розливки сталі сифонним засобом. Для регулювання задаваної кількості алюмінію до кристалізатору надано рекомендації щодо раціональних швидкостей

подачі дроту в залежності від швидкості розливки. Наведено галузі застосування розроблених методик та результатів досліджень.

Дослідження, проведені за допомогою математичного моделювання, дозволили вивчити тепло- та масообмінні закономірності під час плавлення брухту в різних зонах конвертерної ванни. Запропоновані розробки сприяли вдосконаленню технології виплавки сталі у 250-т конвертерах Дніпровського металургійного комбінату (ДМК). Сумарний економічний ефект від впровадження результатів даної роботи у 1987 році склав 376406 карбованців, частка автора склала 30% - 113922 карбованця.

Дослідження з застосуванням математичного моделювання полягли в основу розробки та впровадження ресурсоенергозберігаючих технологій виплавки сталі (технологічні інструкції ТИ 840-С-02-87, ТИ 840-П2-01-87) в 100 т дугової сталеплавильній печі Біларуського металургійного заводу (м.Жлобін).

Впровадження названих розробок дало наступні результати:

1. Знижено тривалість плавки на 10 хвил. (7%).
2. Знижено витрати електроенергії за рахунок застосування пінних шлаків та роботи ДСП по технології з "болотом" на 1,5%.

Економічний ефект за 1990 рік склав 113586 карбованців, частка автора склала 50% - 56793 карбованця.

За результатами досліджень кінетики плавлення твердих добавок різних матеріалів та виробів у ковші розроблено рекомендації щодо раціональних режимів ресурсозберігаючої позаагрегатної обробки сталі у ковшах великої ємності з метою доводки за хімічним складом, рафінування, мікролегування та модифіціювання металу.

Розроблені математичні моделі, алгоритми та пакети прикладних програм впроваджено в інституті чорної металургії (ІЧМ) НАН України (м.Дніпропетровськ) та Біларуській політехнічній академії (м.Мінськ) для проведення НДР на металургійних комбінатах. На комбінаті "Азовсталь" освоєно і впроваджено технологію розкислення сталі великогабаритним алюмінієвим зливком в ковші після випуску плавки з конвертера, рафінування сталі кусковою ТШС в ковші, а також технологію доводки і мікролегування сталі на установці доводки металу з сумарним економічним ефектом за 1982-1990 р.р. 3,2 млн. карбованців (частка автора складає 320 тис. карбованців)

Результати роботи впроваджено в навчальний процес на металургійному та технологічному факультетах Дніпродзержинського державного технічного університету і застосовуються під час читання лекцій та проведення практичних занять на курсах: "Моделювання та керівництво сталеплавильними процесами", "Розливка сталі", "Позапічні методи обробки сталі", "Математичне моделювання теплофізичних процесів", "Обчислювальний експеримент в металургії".

Особистий вклад в наукову розробку. Дисертація є самостійною роботою автора і ґрунтується на опублікованих раніше результатах його досліджень. На різних етапах цих досліджень автор користувався консультаціями видатних вчених (Вихлевщук В.А., Никитенко М.І., Огурцов А.П.). У співавторстві з ними опубліковано кілька наукових робіт. Зміст дисертації є подальшим розвитком положень, викладених в цих публікаціях, в значній мірі містить нові дослідження автора і не ущемлює інтереси консультантів.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідалися на III, IV та V Всесоюзних конференціях з тепло- та масообмінних процесів в ваннах сталеплавильних агрегатів (м.Маріуполь, 1982, 1986, 1991 р.р.), Всесоюзних наукових конференціях: "Теорія і практика теплової роботи металургійних печей" (м.Дніпропетровськ, 1988 р.), "Процеси розливи, модифікація та кристалізація сталі і сплавів" (м.Волгоград, 1990 р.), "Проблеми кристалізації сплавів та комп'ютерне моделювання" (м.Іжевськ, 1990 р.), "Моделювання фізико-хімічних систем та технологічних процесів в металургії" (м.Новокузнецьк, 1991 р.), "Вдосконалення металургійної технології в машинобудуванні" (м.Волгоград, 1991 р.), "Автоматизація проектування та керування якістю відливки" (м.Ленінград, 1991 р.); на міжнародних конференціях: "Тепло-і масоперенос в технологічних процесах" (м.Юрмала, 1991 р.), "Тепло-і масообмін та гідродинаміка в турбулентних течіях" (м.Алушта, 1992 р.).

Публікації. З теми дисертації опубліковано 35 наукових робіт, в тому числі одна монографія, захищено 2 винаходи СРСР.

Обсяг та структура роботи. Основний зміст дисертації викладено на 267 сторінках машинописного тексту. Робота складається з вступу, семи глав, висновків, має список використаної літератури (234 назви), додатки і містить 58 малюнків та 17 таблиць.

Основні положення, що виносяться на захист:

- 1) алгоритми розрахунку кінетики плавлення твердих матеріалів в розплаві;
- 2) математичні моделі та алгоритми розрахунку:
  - процесу плавлення у киснево-конвертерній ванні преспакетів з подовжнім отвором;
  - динаміки нагріву та плавлення шихти у дуговій сталеплавильній печі;
  - формування рафінуючого шлаку з кускових твердих матеріалів шлакостворюючих компонентів (вапна та плавикового шпату) за умов випуску металу з конвертера в сталерозливний ківш;
  - процесу плавлення чушкового алюмінію розташованого на межі розділу шлаку і металу в сталерозливному ковші;

- кінетики плавлення, руху і наступного усереднення рідкої фази кускових матеріалів в процесі випуску металу з конвертера в сталерозливний ківш (з урахуванням гідродинаміки розплаву);

- кінетики плавлення порошкового дроту у сталерозливному ковші;

- кінетики плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка в рідкому металі;

- кінетики плавлення кускових матеріалів у рідкій сталі під час сифонного заповнення виливниці;

- кінетики плавлення дроту, що уводиться в кристалізатор МБЛЗ.

3) Результати чисельних досліджень на підставі розроблених математичних моделей та алгоритмів:

- впливу величини подовжного отвору у преспакетах однакової маси на тривалість їх розплавлення у киснево-конвертерній ванні;

- процесу нагріву та плавлення шихти у дуговій сталеплавильній печі в залежності від маси металу, що лишається в печі від попередньої плавки;

- процесу формування рафінуючого шлаку з кускових твердих шлакостворюючих матеріалів в залежності від швидкості обтікання компонентів суміші металом та їх фракційного складу;

- процесу плавлення чушкового алюмінію, розташованого на межі розділу шлаку та металу у сталерозливному ковші в залежності від швидкості обтікання металом у процесі випуску та продувки;

- процесу засвоєння титановміщуючих кускових феросплавів у рідкій сталі у процесі випуску плавки з сталеплавильного агрегату в сталерозливний ківш в залежності від їх фракційного складу;

- кінетики плавлення порошкового дроту у рідкій сталі під час витримки металу у сталерозливному ковші в залежності від товщини оболонки, діаметру дроту, швидкості уводу та температури металу;

- кінетики плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка в залежності від витрат аргону під час продувки через осьовий отвір та глибини його занурювання в процесі витримки металу в сталерозливному ковші;

- кінетики плавлення кускових рідкоземельних матеріалів в залежності від їх фракційного складу та температури металу під час сифонної розливки;

- кінетики плавлення дроту в металевій оболонці, що вводиться в кристалізатор МБЛЗ в залежності від швидкості його уводу.

4) Перевірка в лабораторних та дослідно-промислових умовах адекватності розроблених методик розрахунку кінетики плавлення матеріалів у розплаві.

5) На підставі використання чисельного моделювання процесів плавлення матеріалів у технологічній низці виробництва сталі

запропоновані рекомендації щодо вдосконалення цих процесів та їх впровадження у виробництво.

## ЗМІСТ РОБОТИ

### 1. Стан питання і задачі дисертаційної роботи.

З аналізу літературних джерел, присвячених дослідженням процесів плавлення твердих матеріалів у рідкому металі, постають наступні задачі досліджень:

- розробка ефективних алгоритмів розрахунку кінетики плавлення твердих матеріалів у розплаві, котрі враховують немонотонність руху меж фазових переходів, теплові ефекти взаємодії поверхні тіла з розплавом та можливі процеси повторного наросту оболонки розплаву;
- розробка математичних моделей та дослідження процесу плавлення матеріалів у всіх основних технологічних агрегатах під час виробництва сталі.

### 2. Плавлення тугоплавких і легкоплавких матеріалів в розплаві.

В главі докладно описано методики розрахунку кінетики плавлення тугоплавких і легкоплавких тіл в розплаві. Рівняння теплопроводності для рідкої, твердої фаз тіла та сталльної оболонки має вигляд:

$$C_v(r, t_k) \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^v} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^v \lambda(r, t_k) \frac{\partial t_k(r, \tau)}{\partial r} \right), \tau > 0, \quad (1)$$

де  $k=1$ -рідка фаза тіла;  $k=2$ -тверда фаза тіла;  $k=3$ -затверділа оболонка розплава,  $v$ - ознака форми тіла.

Під час плавлення легкоплавких сплавів врахування теплоти фазового переходу в тілі здійснюється шляхом введення ефективної теплоємності з рівномірним її розподілом усередині інтервалу температур солідус-ліквідус. Значення температур у внутрішніх точках тіла визначаються із різницевого аналогу рівняння (1):

$$\frac{t_i^{n+1} - t_i^n}{\Delta \tau} = \frac{2}{\Delta r^2 \rho_i^n C_i^n} \left[ \frac{t_{i-1}^n - t_i^n}{\frac{1}{\lambda_{i-1}^n} + \frac{1}{\lambda_i^n}} - \frac{t_i^n - t_{i+1}^n}{\frac{1}{\lambda_i^n} + \frac{1}{\lambda_{i+1}^n}} + \frac{v}{i} \frac{t_{i+1}^n - t_{i-1}^n}{\frac{1}{\lambda_{i+1}^n} + \frac{1}{\lambda_{i-1}^n}} \right] \quad (2)$$

$i=1, 2, 3, \dots, M,$

де теплофізичні параметри  $\lambda_i^n$ -теплопровідність,  $\rho_i^n$ -густина,  $c_i^n$ -теплоємність визначаються на попередньому часовому шарі "n".

Розрахунок надмірної температури  $t_n^{n+j}$  (згідно з методом Дюзинбера) здійснюється за рівнянням:

$$t_n^{n+j} = t_L^T + \frac{\Delta\tau}{\rho_M^n c_M^n \Delta\tau} \left[ \alpha (t_p^n - t_L^T) + \frac{\lambda_M^n}{\Delta\tau} (t_{M-1}^n - t_L^T) \right] + \frac{\lambda_M^n}{\lambda_M^n + \lambda_p} \frac{Q_\Sigma}{c_M^n}, \quad (3)$$

де  $Q_\Sigma$  - тепловий ефект взаємодії твердого тіла і розплаву, (Дж/кг);  $t_L^T$  - температура плавлення тіла, °С; індекс "р" стосується розплаву.

Для легкоплавких матеріалів враховується можливий повторний наріст оболонки розплаву. Для умов природньої конвекції в розплаві проведено порівняння розрахункових та експериментальних результатів щодо тривалості плавлення тіл сферичної форми. Розходження між розрахунковими та експериментальними даними, котрі отримано в інституті чорної металургії (ІЧМ) НАН України, не перевищує 10% [1,2,28]. Розроблені алгоритми розрахунку тугоплавких та легкоплавких матеріалів використано при дослідженні кінетики плавлення дроту в сталерозливному ковші та кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок.

Одним з найбільш ефективних способів ресурсозберігаючої технології доводки металу є увод дроту в розплав сталерозливного ковша, проміжного ковша або кристалізатор машини безперервного лиття заготовок. В даній роботі розглядається плавлення дроту з чистого матеріалу (алюміній) та порошкового дроту в сталій оболонці.

Проведено розрахунки кінетики плавлення дроту діаметром 6, 9, 12 та 15 мм при температурі розплаву 1550, 1600 та 1650 °С та швидкості вводу 1, 4, 10 та 12 м/с [3]. Результати розрахунків показали, що для всіх розглядаємих варіантів дріт усередині сталі оболонки розплавляється у 2 - 3 рази швидше, ніж встигає розплавитись намерзла сталь. Встановлено, що час розплавлення оболонки значно збільшується із збільшенням діаметру алюмінієвого дроту, хоч максимальна товщина оболонки практично не залежить від згаданого фактора. Збільшення швидкості уводу дроту в сталь, що призводить до підвищення коефіцієнту тепловіддачі, забезпечує зменшення товщини намерзаючої оболонки і суттєве скорочення часу її повного розплавлення. Встановлено також, що підвищення температури сталі значно прискорює процес розплавлення алюмінію та намерзлої оболонки.

Досліджено тривалість плавлення дроту діаметром 3 мм в рідкій фазі безперервного зливка розтином 250×300 мм, відливаемого на МБЛЗ в умовах Біларуського металургійного заводу. Розрахунки проведено для середньої температури рідкої сталі в кристалізаторі порядку 1520 °С та швидкостей 0,3, 0,35, 0,40 та 0,45 м/с, що відповідає швидкостям розливки металу 0,6, 0,7, 0,8 та 0,9 м/хвил. Аналіз результатів показує, що тривалість розплавлення дроту суттєво знижується із підвищенням швидкості її вводу в кристалізатор. Для вибраних швидкостей введення дроту він встигає розплавитись, знаходячись в кристалізаторі.

Одним з найбільш ефективних та перспективних способів мікролегування, модифіціювання та доводки сталі є увод твердих добавок в рідкий метал в металевій оболонці (у вигляді порошкового дроту). Проведено розрахунки тривалості плавлення порошкового дроту, котрий складається з порошкоподібних сілікокальцію (СК-30) лігатури РЗМ (ФСЗОРЗМ30) в сталевій оболонці [4,26]. Товщину оболонки приймали дорівнюючою 0,2 та 0,5 мм. Визначено, що тривалість плавлення порошкового дроту лімітується розплавленням початкової металеві оболонки та намерзаючої на ньому оболонки сталі (товщиною 1-3 мм) і значно підвищується при зниженні температури рідкої сталі, зменшенні швидкості вводу та збільшенні діаметру і товщини металеві оболонки.

### 3. Дифузійне плавлення понадтугоплавких матеріалів.

Процес плавлення понадтугоплавкого тіла в розплаві має два періоди. Тепловий період визначається намерзанням та плавленням сталеві оболонки на поверхні тіла і подібний до теплового періоду плавлення тугоплавкого тіла. Дифузійний період плавлення тіла характеризується взаємопов'язаними процесами зовнішнього та внутрішнього тепло- і масопереносу. До рівнянь описуючих процеси теплопереносу додається рівняння дифузії оксидів:

$$\frac{\partial \bar{C}(r, \tau)}{\partial \tau} = D \left[ \frac{\partial^2 \bar{C}(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{v}{r^v} \frac{\partial \bar{C}(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad 0 \leq r \leq z_0, \quad \tau > \tau_T, \quad (4)$$

де  $\tau_T$  - тривалість теплового періоду плавлення, з відповідними граничними та початковими умовами.

Отримана система рівнянь розв'язується при наявності додаткових умов зв'язку тепло- і масопереносу на поверхні плавлячого тіла. Для чисельного розв'язання даної задачі розроблено алгоритм розрахунку на основі методу Дюзинбера [5].

Дана методика використовується для розрахунку дифузійного плавлення вапна в шлаковому розплаві та рідкому плавиковому шпата, а також розчинення брухту під час комбінованої продувки конвертерної ванни.

Визначальною ланкою процесу шлакостворення є розчинення вапна у шлаковому розплаві. Вапно, що додається в плавку має швидко створювати реакцієспроможний шлак. Для цього необхідно створити умови, щоб швидкість розчинення вапна в розплаві була достатньо високою. Прискорення розчинення куска вапна в шлаковому розплаві пояснюється зниженням температури плавлення вапна у зв'язку з інтенсивним "всмоктуванням" оксидів заліза та кремнезему.

Розрахунками встановлено, що збільшення вмісту окислів заліза в шлаку суттєво знижує тривалість розчинення вапна в шпаци. Для всіх варіантів розрахунку прогрівання куска до температури розплаву закінчується на початку процесу розчинення. Після прогрівання куска швидкість його розчинення збільшується, бо за рахунок зменшення розміру куска збільшується коефіцієнт масовіддачі [6].

З використанням математичного моделювання процесів плавлення плавикового шпату під дією тепла рідкої сталі і наступного дифузійного плавлення в отриманому розплаві вапна розглянуто закономірності формування рафінуючого шлаку з ТШС під час обробки маловуглецевої спокійної сталі в ковші ємністю 250 т [7,8].

Згідно з діаграмою стану  $\text{CaO} - \text{CaF}_2$  плавлення поверхневого шару вапна починається при вмісті у ньому не менше 45% рідкого  $\text{CaF}_2$ . При цьому температуру плавлення поверхневого шару вапна можна відобразити у вигляді кусково-лінійної залежності від процентного вмісту  $\text{CaF}_2$ :

$$t_{\text{пл}} = \begin{cases} 2050 - 10 \cdot C_{\text{п}}, & \text{при } C_{\text{п}} \leq 60\% \\ 1740 - 4.8 \cdot C_{\text{п}}, & \text{при } C_{\text{п}} > 60\% \end{cases} \quad (5)$$

де  $C_{\text{п}}$  - процентний вміст рідкого плавикового шпату в поверхневому шарі вапна.

Визначено, що тривалість формування рафінуючого шлаку з однаковою температурою сталі у вирішальній мірі визначається розміром кусків компонентів ТШС та інтенсивністю перемішування суміші з рідким металом. Отримані закономірності використано для визначення необхідного фракційного складу ТШС в залежності від умов формування шлаку в ковші. Встановлено, що для забезпечення інтенсивного (за 1-2 хвил) формування рафінуючого шлаку під час вводу ТШС під струмінь маловуглецевої сталі з конвертера, діаметр кусків вапна і плавикового шпату повинен складати не більше 30 мм.

Результати розрахунків підтверджено дослідженнями та практикою конвертерних цехів комбінатів "Азовсталь", "Криворіжсталь" та ім. Дзержинського; при використанні ТПС згаданого гранулометричного складу забезпечується швидке формування шлаку та досягається ступінь десульфурації спокійної сталі в ковшах з кислотою та основною футеровкою в межах 30-50%. Водночас додатково встановлено, що для уникнення швидкої гідротації вапна та винесення суміші з ковша газовими потоками, доцільно також обмеження мінімального розміру кусків ТПС (не менше 5 мм).

Чисельне дослідження плавлення брухту здійснювалося при різних швидкостях обтікання куска брухту розплавом та початкових температурах заваленого брухту. Враховуючи, що блюм або преспакет є найбільш важкими та великими кусками у складі завальної шихти, за тривалістю їх розплавлення можна оцінити час плавлення всієї шихти. В даній роботі досліджено кінетику плавлення брухту, котрий в розрахунках подано у формі пластини, що знаходиться на межі реакційної та застоїної зон в процесі комбінованої продувки конвертерної ванни [9-11,29].

Проведено розрахунки кінетики плавлення сталюго брухту у вигляді : 1 - блюмінгового обрізу розміром 400×400×850 мм; 2 - преспакетів розміром 700×1000×1800 мм. Розрахунки проведено з врахуванням аналізу літературних даних з питань швидкостей обтікання потоками розплаву куска брухту в різних областях конвертерної ванни. Розрахунки проведено при початкових температурах заваленого брухту в діапазоні від 0 до 900 °С, вище якої брухт нагрівати не рекомендується через різке збільшення тривалості підогріву та можливості появи рідкої високоокисленої фази металу.

В результаті розрахунків встановлено лінійну залежність часу плавлення блюму, що міститься між реакційною та застоїною зонами, від його початкової температури при різних швидкостях обтікання потоками розплаву. Більш складний характер ця залежність має у випадку плавлення преспакетів, що в першу чергу зумовлено значним впливом температури на теплофізичні властивості спресованого брухту. Проведені дослідження сприяли вдосконаленню технології виплавки сталі у 250-т конвертерах і впроваджено на Дніпровському металургійному комбінаті.

#### 4. Несиметричне плавлення матеріалів.

В деяких задачах теплотехнології сталеплавильного виробництва можливі випадки, коли плавлення твердих матеріалів правильної геометричної форми неможливо описати схемою симетричного плавлення. Наприклад, деякі матеріали, що мають питому вагу меншу

питомої ваги рідкої сталі, але більшу такової рідкого шлаку під час загрузки в сталеплавильний агрегат містяться на міжфазній межі шлак-метал. До таких матеріалів, наприклад, відносяться шлак від виробництва сілікомарганцю та алюмокремністий шлак, що застосовується при розкисленні металу в мартеновських печах Дніпровського металургійного комбінату. Кінетику плавлення вказаних матеріалів наведено в роботах [12,30].

В цій главі описуються математичні моделі плавлення легкоплавких та тугоплавких матеріалів, котрі за формою близькі до пластини і розташовані між межами розділу двох рідин. На верхній поверхні пластини враховується процес намерзання шлакової оболонки та її наступне розплавлення. Аналогічно, на нижній поверхні враховується процес намерзання та наступне плавлення металевої оболонки. При плавленні тугоплавкої пластини математична модель процесу описується рівнянням теплопроводності з двома зовнішніми межами плавлення (намерзання). А при плавленні легкоплавкої пластини необхідно враховувати можливе плавлення пластини усередині шлакової та металевої оболонок.

У практиці виробництва сталі є також випадки плавлення матеріалів, котрі частково занурені в рідкий метал або шлак. Якщо форма таких матеріалів така, що її можна розглядати у вигляді пластини, то їх плавлення також описується несиметричною схемою плавлення у одновимірній постановці задачі. Розглянуто 2 можливих випадки: плавлення із збереженням розплаву на верхній поверхні пластини і частковим або повним вилученням розплаву. Для чисельного розв'язання вказаних процесів розроблено алгоритми розрахунку на основі методів Дюзинбера і М.І. Никитенко. Розроблені математичні моделі і алгоритми розрахунку несиметричного плавлення матеріалів використано для розрахунку плавлення чушкового алюмінію на межі розділу шлак-метал та плавлення преспакетів з подовжніми отворами у кисневому конвертері.

Розкислення сталі алюмінієм звичайно проходить шляхом введення чушкового алюмінію в процесі випуску металу із агрегату в ківш. Присадка чушкового алюмінію використовується також для корегування вмісту цього елемента в сталі на установках доводки сталі. Тому має значний практичний інтерес визначення тривалості плавлення чушки при різних температурах та відносних швидкостях руху металу, характерних для процесів випуску його з агрегату в ківш та доводки.

Методами математичного моделювання визначено тривалість плавлення чушки товщиною 65 мм при таких умовах: в процесі випуску металу з конвертера ( $t_p=1580\text{...}1650$  °C) при відносній швидкості руху  $V_0$  від нуля (застійна зона ковша) до 15 м/с (в

струмені); в процесі доводки сталі в ковші ( $t_p=1580...1650$  °C) та відносній швидкості руху дорівнюючій 0 (застойна зона ковща) та 0.2 - 1 м/с (в зоні продувки).

Визначено, що тривалість розплавлення чушки в застоїних зонах ковша приблизно в 40 разів більша, ніж при вводі під струмінь металу. Це свідчить про доцільність присадки алюмінію під час випуску плавки з агрегату лише під струмінь металу з врахуванням можливості попадання чушок в застоїні зони. Алюміній належить присаджувати не пізніше ніж за 165 с до моменту закінчення випуску плавки з агрегату в ківш [13].

Процес плавлення алюмінієвої чушки на межі шлак - метал під час доводки сталі в ковші розглянуто як розплавлення пластини з несиметричними граничними умовами. Тривалість плавлення алюмінієвої чушки та товщина намерзлої металевої оболонки на ній значно збільшуються при зниженні температури рідкої сталі та швидкості обтікання. Це свідчить про необхідність введення алюмінію у навколофурмену зону з найбільш інтенсивним перемішуванням металу. Враховуючи можливість попадання чушок в застоїні зони, алюміній має вводитися не пізніше ніж за 380 с до закінчення аргонної продувки металу в ковші.

Ефективним засобом підвищення швидкості плавлення преспакетів в кисневому конвертері є організація каналів у них для збільшення площі контакту металу з пакетом. Враховуючи, що довжина пакету значно перевищує його поперечні розміри: котрі між собою несуттєво відрізняються, за розрахункову область вибрано порожній циліндр, зовнішній радіус якого визначається у вигляді  $R = \sqrt{ab / \pi}$ , де  $a$  і  $b$  - розміри поперечного розтину пакету. Процес плавлення описується нестационарними одномірними рівняннями теплопроводності та дифузії у циліндричній системі координат з двома зовнішніми рухомими межами плавлення [14,15].

При виготовленні пакету з отвором передбачається, що його зовнішні розміри та маса не змінюються. Пакет має пористу структуру. При збільшенні діаметру отвору ( $a, b = \text{const}$ ) пористість пакету зменшується і, відповідно, змінюються теплофізичні характеристики матеріалу пакету. Теплопроводність матеріалу при зміні його пористості визначалася за формулою В.І. Оделевського:

$$\lambda = \lambda_k (1 - 1,5\P), \quad (6)$$

де  $\lambda_k$  - теплопроводність компактного матеріалу;  $\Pi$  - пористість.

Теплоємність та теплоту фазового переходу визначали за аналогічними формулами.

Проведено розрахунки по визначенню тривалості розплавлення пакетів з отворами в залежності від відношення внутрішнього діаметра

отвору в пакеті до зовнішнього еквівалентного діаметра пакета. Зважаючи на наявність досить низьких значень коефіцієнтів теплопроводності пакету, при проведенні розрахунків не враховували процес намерзання розплаву. Дані про пористість, теплофізичні параметри пакетів та тривалість їх розплавлення наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Тривалість  $\tau$  розплавлення пакета в залежності від відношення діаметра внутрішнього отвору  $d$  до зовнішнього діаметра  $D$ .

$\frac{d}{D}, \%$	П	$\rho_n,$ кг/м <sup>3</sup>	$\lambda_n,$ Вт/мК	$C_n,$ Дж/кгК	$Q_n,$ Дж/кг	$\tau,$ с
0	0,57	3500	4,3	305	118250	288
10	0,55	3535	5,4	322	124644	175
20	0,53	3646	6,0	332	128539	166
30	0,51	3846	7,2	350	135602	164
40	0,47	4167	9,0	379	146902	157
50	0,4	4667	11,9	425	164530	136

При збільшенні діаметра внутрішнього отвору тривалість розплавлення пакету значно зменшується. Так, наприклад, коли діаметр отвору становить 50% діаметра пакету час розплавлення зменшується більше ніж у 2 рази в порівнянні з пакетами тих же габаритів і маси, але не маючих отвору. Пакети з подовжніми отворами дозволяють також спростити під'ємно-транспортні операції при їх використанні в різних сталеплавильних агрегатах. Розроблено конструктивну документацію у копровому цеху ДМК щодо модернізації гідравлічного пакетировочного пресу моделі Б1642 зусиллям 16 МН з метою отримання пакетів з отворами.

### 5. Дослідження кінетики плавлення та траєкторії руху кускових матеріалів.

Важливими параметрами позапічних технологій розкислення, легування, мікролегування сталі твердими добавками є фракційний склад феросплавів, лігатур, алюмінію та місце і момент їх вводу в

ківш в процесі випуску плавки з сталеплавильного агрегату. В цій главі розглянуто методіку комплексного розв'язання задачі визначення раціональних параметрів технології позапічної обробки сталі твердими кусковими матеріалами в процесі випуску плавки з конвертера в сталерозливний ківш та сифонної розливки металу. Дана методіка ґрунтується на чисельному розв'язанні двовимірної задачі гідродинаміки випуску металу в сталерозливний ківш або виливницю, розв'язанні сумісної задачі двовимірного руху та плавлення кускових матеріалів з урахуванням отриманих полів швидкостей розплаву, а також розв'язання задачі масообміну (усереднення) рідкої фази добавки в об'ємі металу.

В одному з самих розповсюджених (для двовимірних задач) методів розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса природні змінні замінюються на завихренність та функцію току. Основною перевагою даного підходу є те, що при введенні даних змінних, вилучається тиск, точніше вилучаються всі складності, пов'язані з його розрахунком. При дослідженні процесу випуску металу з кисневого конвертера в сталерозливний ківш передбачалося, що ківш має циліндричну форму. Під час випуску з конвертера струмінь металу падає практично постійно в центр ковша, завдяки його руху в напрямку зміщення струменя. Таким чином, розрахункова область може бути зведена до половини вісьового розтину ковша, тобто тривимірна задача гідродинаміки розплаву зводиться до двовимірної осесиметричної задачі; в роботі використовується алгебраїчний підхід врахування турбулентності [16]. Для розв'язання системи рівнянь гідродинаміки розплава використовується ефективний метод, запропонований професором М.І. Никитенко. Проведено розрахунки гідродинамічних процесів під час випуску металу з кисневого конвертера у 250-тонний сталерозливний ківш для умов Дніпровського металургійного комбінату.

Наведено методіку руху металодобавки під час випуску металу з конвертера в ківш, котра складається з трьох етапів: рух у повітрі до зустрічі з поверхнею розплава; проникнення добавки в розплав (удар та перехід через вільну поверхню); рух усередині розплаву. Перший та другий етапи короткочасні. Проникнення добавки через вільну поверхню розплаву призводить до зменшення її швидкості. Покладено, що добавка падає вертикально униз на поверхню рідкого металу.

Рух куска описано рівнянням виду:

$$m(\tau) \frac{d\vec{g}(\tau)}{d\tau} = \vec{F}_p + \vec{F}_A + \vec{F}_D + \vec{F}_B, \quad (7)$$

де  $\bar{\vartheta}(\tau)$  - швидкість руху куска, м/с;  $\bar{F}_p = m\bar{g}$  - вага куска;  $m(\tau)$  - маса куска в момент часу  $\tau$ , кг;  $\bar{F}_A = -m^*(\tau)\bar{g}$  - виштовхуюча сила;  $\bar{F}_D = -km^*(\tau)\frac{d\bar{V}}{d\tau}$  - сила, зумовлена рухом куска в рідині;  $\bar{F}_B = -C_f \cdot S(\tau) \cdot \frac{\rho_p(\tau)}{2} |\bar{\vartheta} - \bar{V}| \cdot (\bar{\vartheta} - \bar{V})$  - сила опору куска;  $\bar{\vartheta} - \bar{V}$  - швидкість руху куска відносно розплава;  $C_f$  - коефіцієнт опору куска;  $S(\tau)$  - площа миделевого розтину куска;  $\bar{V}$  - швидкість розплава;  $m^*(\tau)$  - маса розплава, витиснена куском в момент часу  $\tau$ .

Під час розрахунків прийнято, що у випадку, коли траєкторія руху куска перетинає межу розрахункового об'єму (бокову стінку, дно ковша), його удар вважається абсолютно пружним, тобто горизонтальна і вертикальна складаючі швидкості куска змінюють знак на протилежний, а при досягненні вільної поверхні вертикальна складаюча дорівнюється нулю.

Виконано розрахунки по визначенню тривалості плавлення та траєкторій руху алюмінієвих гранул сферичної форми в залежності від їх розміру, моменту та місця вводу у 250-тонний ківш під час випуску плавки з конвертера для умов Дніпровського металургійного комбінату. Розрахунок проводився до повного розплавлення гранули усереднені розплаву в ковші або до моменту спіливання гранули на вільну поверхню металу [17,18,31,34].

У роботі розглянуто плавлення та рух окремої гранули, оскільки в промислових умовах ввод кускових (гранульованих) добавок з бункерів-дозаторів самопливом в ківш під час випуску плавки з агрегату характеризується значним розсіюванням присадки по дзеркалу металу та роздільним входом у метал часток. Тому в моделі використовується процес плавлення одиноких часток, а не їх ансамблю.

Встановлено, що під час введення добавки під струмінь металу максимальний діаметр гранули, котрий забезпечує її повне розплавлення в об'ємі металу, складає 15-17 мм. Результати розрахунків підтверджено даними дослідно-промислових досліджень в умовах Дніпровського металургійного комбінату. При введенні алюмінієвих гранул діаметром 5-15 мм під струмінь металу під час наповнення ковша приблизно на 1/2 його висоти досяглось звищене (9.9-17.2 %) засвоєння алюмінію низьковуглецевою сталлю. При використанні дрібних кусків та стандартних чушок алюмінію розміром (в поперечнику) 25-50 та 60-70 мм засвоєння алюмінію знижувалося до 6.9-9.0 та 4.8-6.2 % відповідно. Піроефект від взаємодії гранул зі шлаком та повітрям на дзеркалі металу в ковші не спостерігався; при

використанні ж дрібних кусків та чушок піроэффект відмічено не лише в процесі випуску металу з конвертеру, але й після наповнення ковша. Це свідчить про те, що гранульований алюміній діаметром 5-15 мм повністю розплавлявся під рівнем металу в ковші.

Проведено розрахунки по визначенню тривалості плавлення та траєкторій руху кускових феросплавів (тугоплавких ФТИ-30 та легкоплавких ФТИ-65) сферичної форми в залежності від їх розміру та моменту вводу у 250-тонний ківш під час випуску плавки з конвертера для умов Дніпровського металургійного комбінату. Встановлено, що куски діаметром 5 мм розплавляються досягнувши дна ковша; при наповненні ковша на  $1/5 - 1/3$  його рівня куски феросплавів діаметром більше 5 мм виносяться потоками металу, рухаючись вздовж днища, стінки ковша, дзеркала металу, до струменя проти часової стрілки. Після досягнення поверхні струменя, куски знову затягуються ним до днища ковша, практично повторюючи попередню траєкторію до повного розплавлення куска.

За відомим полем швидкостей металу під час випуску з конвертера в сталерозливний ківш та місцем повного розплавлення куска феросплава масоперенос рідкої фази куска визначався за рівнянням [19]:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = -(\bar{V} \cdot \nabla \bar{C}) + \nabla(D_{\text{эф}} \cdot \nabla \bar{C}), \quad (8)$$

де  $\bar{C}$  - об'ємна концентрація переносимої речовини;  $D_{\text{эф}}$  - коефіцієнт ефективної дифузії, враховуючи турбулентний характер руху розплава. На осі симетрії, стінці і днищі ковша задано умови непротікання, а на вільній поверхні і в струмені металу  $\bar{C} = 0$ .

Під час розрахунку плавлення легкоплавкого феросплава, враховуючи невеликі розміри куска, покладали, що феросплав повністю розплавляється усередині оболонки розплаву. В початковий момент часу розрахунку масопереносу (після розплавлення оболонки) за відомими координатами місця розплавлення куска визначаються цілочислені значення координат комірки різницевої сітки, котра використовувалася для розрахунку задачі гідродинаміки металу. В даній комірці зосереджувалася вся рідка фаза куска феросплава. В подальшому розрахунок ведеться за явною різницевою схемою масопереносу рідкої фази феросплава в об'ємі металу.

Плавлення та масоперенос тугоплавкого феросплава йде за трохи ускладненою схемою. Процес масопереносу починається після розплавлення оболонки розплаву. З цього моменту робиться розрахунок сумісних процесів руху куска, його плавлення та

усереднення створюємої рідкої фази. В момент розплавлення чергового шару куска обчислюються відповідні координати розрахункової сітки. До рідкої фази феросплаву, що міститься в даній комірці, додаються розплавлена фаза поверхневого шару куска товщиною  $\Delta g$ . Після повного розплавлення куска триває розрахунок процесу масопереносу до заданої точності усереднення рідкої фази феросплаву.

У тій же главі наведено дослідження кінетики плавлення та траєкторії руху рідкоземельних кускових матеріалів, що вводяться через центрову під час сифонної розливки сталі [20,21,35]. Розрахунки показали, що механічні втрати лігатури у інтервалі температур рідкого металу, характерному для сифонної розливки (1550-1580°C), виключаються при використанні часток діаметром 9 мм та менше. Результати математичного моделювання використано при розробці та засвоєні промислової технології мікролегування металу лігатурою рідкоземельних металів (РЗМ) у центровій. Дослідженнями в промислових умовах встановлено, що введення в центрову лігатури РЗМ на основі лігатури ФС30РЗМ30 в кусках фракцією 2-9 мм забезпечує однаковий рівень та стабільність засвоєння рідкоземельних елементів, котра складає від 41 до 59 %. При використанні кусків лігатури більш великих фракцій засвоєння мікролегувальної добавки сталю зменшується. Відтак, для мікролегування металу у центровій рекомендовано використання лігатури РЗМ фракцією 2-9 мм.

## 6. Плавлення матеріалів складної геометричної форми.

Всю різноманітність реальних металодобавок, що плавляться в розплаві сталеплавильних агрегатів, неможливо звести до найпростіших тіл класичної форми. В даній главі наведено дослідження динаміки нагріву та плавлення шихти (у двовимірній постановці задачі) у дуговій сталеплавильній печі. Вирішено, також, задачу плавлення (у двовимірній та одновимірній постановках) плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка при витримці металу в сталерозливному ковші.

Аналіз способів виплавки сталі в світі показує, що в останні роки електросталеплавильне виробництво розвивається більш високими темпами, а роль електричних печей постійно зростає. Проаналізувавши 500 плавок на 100т ДСП, на Білоруському металургійному заводі, дійшли висновку, що головним фактором, впливаючим на тривалість плавки і на стійкість подини, є кількість розплаву, що лишається в печі після випуску металу. Природньо, виникає задача визначення оптимальної маси лишаемого розплаву з тим, щоб продуктивність печі була найбільшою. З метою дослідження впливу маси залишку

розплаву на тривалість розплавлення шихти у ДСП, проведено математичне моделювання процесу плавлення шихти з урахуванням залишку розплаву.

Розподіл температур у шихті та її рідкій фазі описували двовимірним рівнянням теплопроводності з джерелом теплоти [22,23]:

$$C_{эф}(t, r, z)\rho(r, z) \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(t, r, z) r \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(t, r, z) \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial z} \right] + Q_{экз} + Q_{к он в} \quad (9)$$

Виділення теплоти фазового переходу у інтервалі температур - солідус-ліквідус враховується введенням ефективної теплоємності. Після 10 хвилини процесу підогріву і плавлення шихти виникає додатковий підогрів розплаву за рахунок  $Q_{экз}$  екзотермічних реакцій окислення домішок при подачі кисню з витратою 1300 м<sup>3</sup>/годину. Додатковий підогрів шихти здійснюється за допомогою теплопроводності та конвекції відходячих пічних газів та враховується як джерельний член  $Q_{к он в} = \alpha_V \times (t_r(r, z, \tau) - t(r, z, \tau))$ .

Для чисельного розв'язання двовимірного рівняння теплопроводності з відповідними граничними і початковими умовами застосовано неявну різницеву схему з урахуванням розщеплення теплових потоків по координатам. За запропонованим алгоритмом проведено розрахунки динаміки нагріву і плавлення шихти в залежності від заданої початкової маси залишку розплаву. Задача вирішувалася для 100-т ДСП Білоруського металургійного заводу, однак вказаний алгоритм може бути застосовано для розрахунку динаміки плавлення шихти для ДСП будь-якої ємності.

На мал.1а наведено динаміку зростання рідкої фази шихти в залежності від початкової маси "болота". При збільшенні початкової маси "болота" тривалість плавлення шихти суттєво зменшується. Залежність середньомасової температури наведено на мал. 16.

На підставі отриманих розрахунків та з урахуванням синхронізації процесів виплавки і розливки сталі визначено раціональну кількість лишаемого в печі металу і шлаку, що складає близько 15 т.

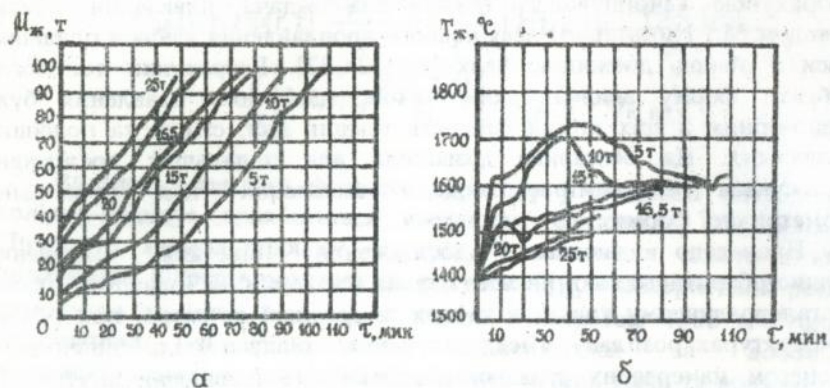
В інституті чорної металургії НАН України розроблено, освоєно та впроваджено в конвертерному цеху меткомбінату "Азовсталь" ресурсозберігаючу технологію мікролегування сталі алюмінієвим зливком, занурюємим під рівень металу в ковші після випуску плавки з конвертеру. Для забезпечення мінімального часу плавлення алюмінієвого зливка в рідкому металі прийнято пелюсткову форму

його поперечного розтину. Розрахункову область для зливка у формі пелюстки наведено на мал. 2.

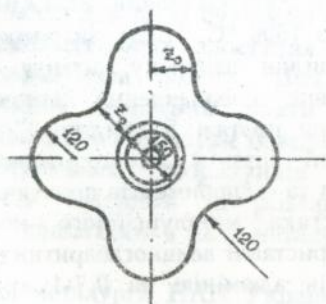
Зміна розмірів пелюсток для злиwkів однакової маси впливає на площу контакту поверхні зливка і розплаву, і, як наслідок, на час плавлення зливка. З метою уточнення вказаного впливу проведено розрахунок (вирішувалася двовимірна задача плавлення зливка методом М.І.Никитенко) часу повного проплавлення злиwkів однакової маси з різною довжиною пелюсток [24,32]. Розрахунки допомогли вибрати форму зливка таким чином, щоб його плавлення було рівномірним з усіх сторін (рівність товщини дна, стінки та половини пелюстки). Ця обставина дозволила для подальших досліджень застосувати одновимірну модель плавлення тіла правильної геометричної форми.

Проведено чисельне дослідження кінетики плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка масою 450 кг і висотою 700 мм в сталерозливному ковші, в умовах природньої конвекції при різних температурах розплаву. Після занурення зливка в сталь одночасно з процесом намерзання сталльної оболонки йде плавлення внутрішніх шарів алюмінію. Встановлено, що тривалість плавлення зливка мало залежить від температури металу і значно менша, ніж тривалість оплавлення намерзлої оболонки. Лімітуючою ланкою в процесі засвоєння алюмінію із зливка є оплавлення оболонки. Водночас тривалість оплавлення оболонки у вирішальній мірі залежить від температури розплаву: при зниженні температури сталі від 1650 до 1580 °С тривалість плавлення зливка збільшилася з 2.8 до 6.5 хвил. Для встановлення адекватності математичної моделі проведено експерименти в дослідно-промислових умовах. Алюмінієвий зливоч масою 450 кг вводили в сталерозливний ківш ємністю 350 т із сталлю СтЗкп, з температурою 1600 °С. Після витримки зливка в металі на протязі 4.5 та 5 хвилин занурену штангу виймали із зливка. Встановлено, що повне розплавлення зливка проходило після витримки в розплаві на протязі 5 хвилин. При меншій тривалості витримки на поверхні штанги спостерігалися залишки зливка. Результати розрахунків та експериментів практично співпадають [33].

Промислова практика металургійного комбінату "Азовсталь" показала, що при використанні великогабаритних алюмінієвих злиwkів забезпечується економія алюмінію на 0.7-1 кг/т сталі, однак для повного розплавлення зливка потрібно додатково близько 5 хвилин, що в деяких випадках призводить до порушення виробничого ритму у високопродуктивному комплексі конвертер - установка доводки металу - машина безперервного лиття, особливо при виробництві товстих слябів. Відтак, є актуальним пошук прискорення процесу плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка, наприклад, за рахунок вводу



Мал. 1. Динаміка зростання маси (а) та середньомасової температури (б) рідкої фази шихти.



Мал. 2. Розрахункова область алюмінієвого зливка.

аргону по осі зливка через футерований стрижень.

Проведено чисельне дослідження кінетики плавлення алюмінієвого зливка масою 300 кг і висотою 0.5 м у ковші ємністю 350т з маловуглецевою сталлю в процесі продувки металу аргонном. Встановлено, що подача аргону кількістю до 30-40 м<sup>3</sup>/г забезпечує значне (з 5 до 2-3 хвил.) зменшення тривалості плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка в ковші; подальше звищення витрат аргону менш ефективно і економічно недоцільно. Показано також, що тривалість плавлення алюмінієвого зливка з одночасною обробкою сталі аргонном суттєво (у 1.3-1.4 рази) зменшується при збільшенні глибини занурення зливка в рідкому металі [25]. Результати розрахунків підтверджено дослідно-промисловими експериментами в умовах меткомбінатів "Азовсталь" та Череповецького. Визначено, що тривалість плавлення зливка без одночасної продувки аргонном в сталі типу СтЗсп складала близько 5 хвил., а з продувкою аргонном кількістю 30-40 м<sup>3</sup>/г на глибині близько 2.5 м - біля 2 хвил.

## **7. Техніко-економічні показники результатів дослідження режимів плавлення матеріалів при виробництві сталі.**

У даній роботі проведено чисельне моделювання процесу плавлення матеріалів по всьому технологічному ланцюгу: виплавка, позапічна обробка та розливка металу. Досліджено кінетику плавлення блюму або преспакета, розташованого у найбільш характерній зоні конвертера, - поміж реакційною та застоюною зонами. Проведені розрахунки показали, що плавлення блюму йде лише з боку реакційної зони і в кінетичному режимі, котрий обумовлено високими температурами та швидкостями обвиваючих потоків. Водночас швидкості наморожування, обплавлення та залишкова величина оболонки суттєво залежать від початкової температури брукху при будь-яких швидкостях обтікання.

Доцентом ДДТУ С.І. Морозовим розроблено пакетирувальний прес, котрий дозволяє пакетувати брукх з подовжнім отвором у пакеті. Проведені чисельні дослідження впливу розмірів отвору в пакеті на тривалість його розплавлення в кисневому конвертері під час комбінованої продувки ванни показали, що збільшення діаметру каналу суттєво скорочує час повного розплавлення пакета. Процес плавлення преспакетів не є лімітуючою ланкою у конверторній плавці, і все ж зменшення тривалості розплавлення преспакетів сприяє покращенню теплової та гідродинамічної обстановки у ванні для прискореного розплавлення важковагових кусків брукху.

В період освоєння технології виплавки сталі у 100-т дуговій сталеплавильній печі Білоруського металургійного заводу реалізовано один з аспектів технології вищого технічного рівня: процес завалки і плавлення шихтового матеріалу при використанні рідкого залишку металу і шлаку. З застосуванням методів математичного моделювання досліджено вплив на показники плавки кількості металу, що лишається в печі після випуску.

Під час уводу феросплавів і чистих матеріалів у метал існують проблеми їх низького і непостійного засвоєння, а також екологічні проблеми. Найбільш важливим параметром при подачі дроту в метал є швидкість його уводу. Низька швидкість зумовлює його розчинення у верхніх шарах металу, що сприяє угару активних елементів, погіршується рафінування і модифіціювання металу та розподіл реагенту по об'єму ковша. Висока швидкість дроту призводить до аналогічних результатів. Дріт не встигаючи розчинитися під час занурення, вдаряється об дно ковша і відштовхнувшись від днища та стінок, входить у верхні шари металу або на поверхню.

З урахуванням результатів математичного моделювання визначено, що для промислового використання має бути рекомендовано застосування алюмінієвого дроту помірної товщини (9-12 мм) та високої швидкості його вводу у сталь (10-12 м/с). Результати розрахунку, отримані на підставі розробленої математичної моделі, використано при розробці раціональних режимів уводу через трайб-апарат порошкового дроту в сталерозливний ківш ємністю 160-350 т. Було враховано, що увод мікролегуючих та модифікуючих добавок на установці доводки металу має бути забезпечено за короткий час (не більше 3-5 хвил.). Враховуючи цю обставину було попередньо визначено, що для мікролегування та модифіціювання сталі у ковші ємністю 350 т треба використовувати порошковий дріт діаметром 12-16 мм з металевою оболонкою товщиною 0.2 мм, котрий уводиться у метал із швидкістю 7-10 м/с.

Перспективною є технологія розкислення спокійної сталі у сталерозливному ковші масивним алюмінієвим зливком, котру розроблено в інституті чорної металургії АН України. Проведено математичне моделювання процесу плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка з урахуванням вводу аргону по осі зливка крізь пустий футерований стрижень. У 1983-1986 р.р. на комбінаті "Азовсталь" з використанням алюмінієвих зливків вироблено більше 4 млн. тон сталі. Освоєння нової технології мікролегування сталі рекомендовано у конвертерних цехах інших металургійних підприємств, котрі мають аргонні установки для усереднення металу.

Серед раціональних, з точки зору економічного використання сировинних ресурсів, технологічних методів мікролегування сталі є

увод кускових матеріалів під струмінь у процесі випуску та розливки сталі. За допомогою чисельного моделювання встановлено, що при вводі добавки під струмінь металу максимальний діаметр алюмінієвої гранули, що забезпечує її повне розплавлення у об'ємі металу в сталерозливному ковші складає 15-17 мм.

Результати розрахунків підтверджено даними дослідно-промислових досліджень в умовах Дніпровського металургійного комбінату. При вводі алюмінієвих гранул діаметром 5-15 мм під струмінь металу під час наповнення ковша приблизно на 1/2 його висоти досягалося підвищене (9.9-17.2 %) засвоєння алюмінію низьковуглецевою сталлю. При використанні дрібних кусків та нестандартних чушок алюмінію розміром (у поперечнику) 25-50 та 60-70 мм засвоєння алюмінію знижувалося до 6.9-9.0 та 4.8-6.2 % відповідно.

Значний теоретичний і практичний інтерес становить розрахунок кінетики плавлення кусків лігатури ФС30РЗМ30 з метою визначення необхідної міри їх подрібнення перед уводом у центрову. Вирішення даної задачі показано у пропонуемій дисертаційній роботі. Розрахунки показали, що механічні втрати лігатури у інтервалі температур рідкого металу, характерному для сифонної розливки (1550-1580 °С), виключаються при використанні часток діаметром 9 мм і менше. Результати математичного моделювання використано при розробці та освоєнні промислової технології мікролегування металу лігатурою РЗМ у центровій.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ.

1. Дисертаційна робота направлена на вирішення великої наукової проблеми, що має важливе народногосподарче значення. У ній розроблено теоретичні основи режимів плавлення матеріалів у рідкій сталі, на основі яких досліджено ресурсозберігаючі технологічні процеси під час виплавки, позапічної обробки та розливки сталі. Велика кількість теоретичних розробок знайшла застосування в умовах металургійних підприємств України, Росії та республіки Білорусь.

2. Автором дисертаційної роботи застосовано комплексний підхід.

Дослідження режимів плавлення матеріалів проведено у всіх основних технологічних агрегатах сталеплавильного виробництва. Використано сучасні методи дослідження - математичне моделювання з застосуванням ефективних різницевих методів розв'язання отриманих диференціальних рівнянь та їх систем. Розроблено комплекс програм розрахунку процесів плавлення матеріалів у розплаві. Програми

виконано на алгоритмічній мові ПАСКАЛЬ для ІВМ - сумісних персональних ЕОМ.

3. Підтверджено в лабораторних умовах адекватність розроблених методик розрахунку кінетики плавлення матеріалів у розплаві. Отримані розрахунковим шляхом результати досліджень режимів плавлення матеріалів зіставлялися з експериментальними дослідженнями у дослідно-промислових умовах і підтверджено їх адекватність.

4. При дослідженні режимів плавлення шихти в процесах виплавки сталі отримано такі результати:

- розроблено математичну модель, алгоритм та програму розрахунку кінетики плавлення брухту у конвертерній ванні в умовах комбінованої донно-верхньої кисневої продувки; методами математичного моделювання визначено тривалість плавлення блюмінгової обрізі розміром 400×400×850 та преспакетів 700×1000×1800 мм, що містяться на межі реакційної та застоїної зон конвертерної ванни; отримано залежності тривалості плавлення блюмінгової обрізі та преспакетів від швидкостей обтікання їх потоками розплаву і початкових температур заваленого брухту; виконані дослідження та запропоновані розробки сприяли вдосконаленню технології виплавки сталі у 250-т конвертерах Дніпровського металургійного комбінату;

- розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку процесу плавлення брухту у вигляді пакету з отвором; досліджено вплив форми брухту на тривалість його розплавлення; виготовлення подовжного центрального отвору у пакетах, котрі отримані на пакетировочних пресах, дозволяє скоротити час розплавлення пакетів; так, наприклад, при діаметрі отвору 250 мм час розплавлення зменшується приблизно у 2 рази в порівнянні з пакетами тих же габаритів і маси, але не маючих отвору;

- розроблено математичну модель динаміки нагріву та плавлення шихти в дуговій сталеплавильній печі; на підставі розрахунків визначено оптимальну масу лишаемого в печі розплаву, за якої досягається найбільша продуктивність; проведено розрахунки зміни середньомасової температури "болота" в залежності від початкового залишку розплаву; одержано динаміку зміни рідкої фази шихти в залежності від маси лишаемого розплаву; визначено раціональну масу "болота" для досягнення найбільшої продуктивності 100-т дугової сталеплавильної печі для умов Білоруського металургійного заводу; впровадження запропонованої технології знизило тривалість плавки на 10 хвилин (7%).

5. При дослідженні ресурсозберігаючих режимів вводу матеріалів в процесі випуску металу з кисневого конвертера у сталерозливний ківш отримано такі результати:

- розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку формування шлаку у сталерозливному ковші з кускових плавикового шпату і вапна; проведено чисельне дослідження тривалості формування рафінуючого шлаку в залежності від фракційного складу компонентів та швидкості обмивання їх розплавом; встановлено, що для забезпечення інтенсивності (за 1-2 хвил) формування рафінуючого шлаку при вводі ТШС суворо під струмінь маловуглецевої сталі з конвертера, діаметр кусків вапна і плавикового шпату має складати не більше 30 мм;

- розроблено комплексну математичну модель і алгоритм розрахунку кінетики плавлення, руху та подальшого усереднення рідкої фази кускових матеріалів в процесі випуску металу з конвертера в сталерозливний ківш (з урахуванням гідродинаміки розплаву); визначено, що для мінімізації взаємодії розплавленої добавки алюмінію з окисляючою дією шлаку та атмосфери, необхідно уводити алюмінієві гранули діаметром до 15-20 мм під струмінь металу з агрегату при заповненні ковша на  $1/2-2/3$  його висоти; розроблено попередні рекомендації щодо режимів вводу в сталь титановміщуючих розкислювачів; для прискорення засвоєння феротитану його добавки в процесі випуску плавки необхідно здійснювати на ранній (до  $1/2$  висоти) стадії заповнення ковша; З метою завершення процесу усереднення розплавлених добавок титану у об'ємі ковша увод феротитану необхідно закінчити не пізніше, ніж за 2.2-2.5 хвилини до закінчення випуску плавки. В той же час куски феротитану ФТИЗ0 мають бути розміром не більше 30, а феротитану ФТИ65 - 50 мм.

6. При дослідженні ресурсозберігаючих режимів вводу матеріалів у процесі витримки металу в сталерозливному ковші отримано такі результати:

- розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку кінетики плавлення алюмінієвого дроту в рідкій сталі; визначено кінетичні закономірності плавлення дроту в залежності від температури розплаву, швидкості його введення та діаметра; проведені розрахунки та дослідно-промислові дослідження показали, що технологія доводки сталі за вмістом алюмінію за рахунок введення алюмінієвого дроту (катанки) діаметром 9 мм із швидкістю 12 м/с дозволяє забезпечити високе і стабільне засвоєння алюмінію і організувати виплавку сталі з вузькими межами його вмісту;

- розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку тривалості плавлення порошкового дроту в сталевій оболонці під час вводу в рідку сталь; досліджено режими плавлення порошкового дроту

з сілікокальцію (СК-30) і лігатури РЗМ (ФС30РЗМ30) із сталюю оболонкою товщиною 0.2 та 0.5 мм в процесі продувки металу в ковші; рекомендовано при мікролегуванні і модифіціюванні сталі в ковші ємністю 160-350 т використовувати порошковий дріт діаметром 12-16 мм із сталюю оболонкою товщиною 0.2 мм, що уводиться у розплав із швидкістю 7-10 м/с;

- розроблено математичну модель плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка пелюсткової форми в період витримки металу в ковші; визначено тривалість плавлення зливка від температури металу в ковші; розроблено математичну модель плавлення великогабаритного алюмінієвого зливка пелюсткової форми з одночасною продувкою металу аргоном в ковші; встановлено, що подача аргону у кількості 30-40 куб. метрів у час суттєво зменшує тривалість розплавлення зливка; показано також, що збільшення глибини занурення зливка сприяє зменшенню тривалості його розплавлення.

7. При дослідженні ресурсозберігаючих режимів увода матеріалів в процесі розливки металу отримано такі результати:

- розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку кінетики плавлення часток лігатури ФС30РЗМ30 при мікролегуванні металу в процесі розливки сифоном; визначено необхідну ступінь подрібнення лігатури (до фракції кусків 2-9 мм) перед уводом у центрову, котра забезпечує високе і стабільне засвоєння рідкоземельних елементів; технологію уводу кускових рідкоземельних матеріалів у центрову під час сифонної розливки сталі запроваджено на металургійному комбінаті "Криворіжсталь";

- розроблено математичну модель і алгоритм розрахунку кінетики плавлення дроту у кристалізаторі МБЛЗ; встановлено, що тривалість розплавлення дроту щільно залежить від швидкості його введенні у кристалізатор.

8. Розробленні математичні моделі, алгоритми та результати чисельних досліджень кінетики плавлення матеріалів та виробів було використано при розробці енерго- та ресурсозберігаючих технологій виробництва сталі на основних металургійних комбінатах України, Росії та республіки Білорусь. Сумарний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи склав більше 4-х млн. карб. (у масштабах цін до 1990 р.). Дольова участь автора складає більше 600 тис. карб.

Основний зміст дисертації відображено у роботах:

1. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Стеблов А.Б., Павлюченков И.А. // Минск, "Высшая школа", 1992. - 217с.
2. Павлюченков И.А. Плавление тугоплавких материалов в расплаве // Математическое моделирование. - Днепродзержинск: ДГТУ, 1994. - С. 46-55.
3. Исследование процесса плавления алюминиевой проволоки при вводе в сталь / В.А. Вихлевщук, И.А. Павлюченков, В.Г.Щербинский и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. -1988. - № 2. -С. 32-38.
4. Исследование кинетики плавления порошковой проволоки при вводе в жидкую сталь /Павлюченков И.А., Вихлевщук В.А., Тимошпольский В.И. и др. // Изв. вузов. Энергетика. - 1992.- № 9-10. - С. 87-91.
5. Математическое моделирование процесса диффузионного плавления тел правильной геометрической формы в железоуглеродистом расплаве / А.П.Огурцов, Н.М.Барабаш, И.А.Павлюченков и др. // Изв.вузов. Черная металлургия. -1983.- №10.-С. 37-41.
6. Численное исследование процессов тепло- и массопереноса при растворении извести в шлаковом расплаве / А. П. Огурцов, С.Н.Курганов, Н.М.Барабаш, И.А.Павлюченков и др. // Изв.вузов. Черная металлургия. -1982. - №12. - С. 12-16.
7. Математическое моделирование процесса формирования рафинирующего шлака из кусковой твердой шлакообразующей смеси в ковше /Вихлевщук В.А., Павлюченков И.А., Лепорский С.В. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. -1992. - № 4.- С. 14-15.
8. Промышленная технология внепечного рафинирования стали кусковой и порошкообразными смесями/Харахулах В.С., Вихлевщук В.А., Стороженко А.С., Павлюченков И.А. и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1995. -№1. - С. 11-14.
9. Численное моделирование растворения лома при комбинированной продувке конвертерной ванны /А.А.Гресс, И.А.Павлюченков, Е.В.Сало и др.// Изв.вузов.Энергетика. -1990. - № 7. -С. 96-99.

10. Математическое моделирование кинетики плавления лома при комбинированной продувке конвертерной ванны / И.А.Павлюченков, А.Г.Чернятевич, В.Р. Джувага и др. // Изв.вузов. Черная металлургия.-1987. -№ 6. -С. 116-119.

11. Павлюченков И.А., Кривко Е.М., Чуб П.И. Кинетика плавления коржей шлака силикомарганца в конвертере // Изв.вузов. Черная металлургия. -1987. -№ 7. -С. 11-13.

12. Кривко Е.М., Павлюченков И.А., Чуб П.И. Исследование кинетики плавления шлаков ферросплавного производства в мартеновской печи.// Изв.вузов. Черная металлургия. -1983. -№ 7. -С. 28-32.

13. Моделирование процесса плавления чушкового алюминия при раскислении и доводке стали в ковше / Вихлевщук В.А., Носов К.Г., Поляков В.Ф., Павлюченков И.А. и др. // Известия вузов.Черная металлургия. - 1988. -№9. -С. 31-34.

14. К вопросу использования пакетов с отверстиями при выплавке стали в кислородных конвертерах /С.И.Морозов, И.А.Павлюченков, Е.А.Сало и др. // Изв.вузов. Черная металлургия. -1991. - №8. -С.64-66.

15. Павлюченков И.А., Морозов С.И., Черномаз Г.Н. Плавление пакета с отверстиями в кислородном конвертере.// Математическое моделирование. - Днепродзержинск: ДГТУ, 1994. - С. 56-66.

16. Самохвалов С.Е., Огурцов А.П., Павлюченков И.А. Методика определения параметров турбулентности в численных экспериментах // Теплообмен и гидродинамика в турбулентных течениях. - Алушта.- 1992.- С. 126-127.

17. Разработка рационального сортамента ресурсоэкономных изделий для раскисления стали в ковше / Вихлевщук В.А., Вяткин Ю.Ф., Павлюченков И.А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. -1992. - №2. - С. 12-14.

18. Численное моделирование кинетики плавления легкоплавких кусковых металлодобавок при выпуске металла в сталеразливочный ковш / Харахулах В.С., Вихлевщук В.А., Огурцов А.П., Павлюченков И.А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. -1994.- № 9. - С. 16-18.

19. Кривко Е.М., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. Численное моделирование распределения примесей при заполнении ковша металлом. /Изв. вузов. Чёрная металлургия. - 1991. - № 11. - С. 15-17.

20. Исследование плавления лигатуры РЗМ при микролегировании стали в процессе разливки / Вихлевщук В.А., Коловай Л.В., Пиптюк В.П., Павлюченков И.А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1987. - №12. - С. 126-131.

21. Исследование кинетики плавления раскислителей при химическом закупоривании кипящей стали /Кривко Е.М., Щербинский В.Г., Павлюченков И.А. и др. // Изв.вузов. Черная металлургия.- 1986. - №11. - С. 28-32.

22. Теплотехнические расчеты электросталеплавильных печей Белорусского металлургического завода / В.И.Тимошпольский, И.А.Трусова, И.А.Павлюченков и др. // Изв. вузов. Энергетика. - 1992. - № 7-8. - С. 70-74.

23. Математическое моделирование теплообменных процессов в сверхмощных дуговых сталеплавильных печах/ М.И. Стрелюк, В.И.Тимошпольский, Папкович В.Н., Воронова Н.П., И.А.Павлюченков и др. // Изв. вузов. Энергетика. - 1991. - №5. - С.86-90.

24. Павлюченков И.А. Тепломассообменные процессы при плавлении твердых материалов в жидком расплаве сталеплавильных агрегатов. / Дис. канд. техн. наук. Днепродзержинск. 1983. -155 с.

25. Исследование процесса плавления слиткового алюминия с одновременной продувкой стали в ковше аргоном / Харахулах В.С., Вихлевщук В.А., Павлюченков И.А. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1995. - №1. - С. 18-20.

26. А.с. 1219654 (СССР) Способ легирования стали /К.Г.Носов, Е.М.Кривко, А.П.Огурцов, И.А.Павлюченков и др.- Заявлено 22.02.84. - № 3703597/22-02.- Оpubл.23.03.86. - Бюл. № 11.

27. А.с. 1154341 (СССР) Способ раскисления и легирования стали в ковше / Кривко Е.М., Компаниец В.Н., В.А.Тарасенко, Павлюченков И.А. и др.- Заявлено 18.05.83.-№3591790/22-02.- Оpubл.07.05.85.-Бюл.№ 17.

28. Расчет кинетики плавления пластины в расплаве / Павлюченков И.А., Джувага О.А., Щербинский В.Г. и др. // УкрНИИНТИ. - Днепродзержинск, 1987. - 6с. Деп. № 11392п -Д87. 7.04.87.

29. Математическое моделирование кинетики плавления ферросплавов в кислородном конвертере /Кохан Л.С., Павлюченков И.А., Щербинский В.Г. и др. // УкрНИИНТИ. - Днепродзержинск, 1985. - 5с. Деп. № 2727п -Д85. 12.12.85.

30. Кривко Е.М., Павлюченков И.А., Щербинский В.Г. Исследование кинетики плавления шлаков ферросплавного производства в мартеновской печи методом сеток. // УкрНИИТИ. - Днепродзержинск, 1983. - 5с. Деп. № 331п - Д83. 25.07.83.

31. Расчеты кинетики плавления твердых микродобавок азотированного феррованадия при выпуске металла в ковш / В.А.Вихлевщук, В.И.Тимошпольский, Павлюченков И.А и др. // РЖ "Известия вузов. Энергетика". - М.ВИНИТИ. - Минск, 1992. - 3с.- Деп. №3417. - ВД2 2.12.92.

32. Исследование кинетики плавления слиткового алюминия в жидкой стали методом сеток / Никитенко Н.И., Павлюченков И.А., Вихлевщук В.А. и др. // Черметинформация. - Днепропетровск, 1983. - 6с.- Деп. №2117. - Д83 29.08.1983.

33. Плавление слиткового алюминия при выдержке металла в ковше / Павлюченков И.А., В.И.Тимошпольский, В.А.Вихлевщук и др. // РЖ "Известия вузов. Энергетика". - М.ВИНИТИ. - Минск, 1992. - 6с.- Деп. №2700. - ВД2 31.8.92.

34. Численное моделирование процесса плавления и усреднения гранулированного алюминия при выпуске металла в сталеразливочный ковш / Вихлевщук В.А., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. и др. // Совершенствование металлургической технологии в машиностроении: Тез. докл. Волгоград, 1991. - С. 94-97.

35. Павлюченков И.А., Черномаз Г.Н. Исследование кинетики плавления гранулированных материалов при микролегировании стали в процессе разлива сифонным способом // Моделирование физико-химических систем и технологических процессов в металлургии: Тез. докл. Новокузнецк, 1991. - С. 181-182.

#### Annotation

Pavlyuchenkov I.A. Theory and technology of materials melting during the process of steel production.

Thesis submitted for degree of Doctor of Sciences on ferrous metallurgy Speciality's code 05.16.02. the State Technical University, Dneprodzerzhinsk, 1995, manuscript, 350p., 17 tables, 58 figures, bibliografy - 234 titles.

There are defended 33 articles and 2 author licences.

This dissertation contains the teoretical investigations of materials' melting processes in the steel production technology. The recommendations are made as to optimum mass of melt residue during steel smelting in the 100-tons arc

steel-smelting furnace. The recommendations are made as to the rational fractional composition of the ferroalloys containing titanium, granulated aluminium and components of slag forming mixture, which are used during the processes of alloyage, deoxidation and slag forming in the process of metal tapping from the converter to the steel-pouring ladle.

Worked out mathematical models, algorithms and kinetics' numerical investigations' results' and products' melting were used in the development of power- and resource-saving technologies of steel production at the main metallurgical works of Ukraine, Russian and Byelorussia. The total economic benefit from the implementation of the dissertation's results constitutes more than 4 million roubles (according to the prices before 1990). Author's share holding constitutes more than 600,000 roubles.

#### Аннотация

Павлюченков И.А. Теория и технология плавания материалов при производстве стали.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02-металлургия черных металлов, Государственный технический университет, Днепропетровский, 1995. Рукопись, 350 с., 17 табл. 58 рис., библиогр. 234 назв.

Защищаются 33 статьи и 2 авторских свидетельства.

Диссертация содержит теоретические исследования процессов плавания материалов при производстве стали. Сделаны рекомендации по оптимальной массе жидкого остатка при выплавке стали в 100 т дуговой сталеплавильной печи. Даны рекомендации о рациональном фракционном составе титансодержащих ферросплавов, гранулированного алюминия и компонентов шлакообразующей смеси, применяемых при легировании, раскислении и формировании шлака в процессе выпуска металла из конвертера в сталеразливочный ковш.

Разработанные математические модели, алгоритмы и результаты численных исследований кинетики плавания материалов и изделий были использованы при разработке энерго- и ресурсосберегающих технологий производства стали на основных металлургических комбинатах Украины, России и республики Беларусь. Суммарный экономический эффект от внедрения результатов диссертационной работы составил более 4-х млн. рублей (в масштабах цен до 1990г.). Долевое участие автора составляет более 600 тыс. рублей.

Ключові слова: плавлення, виплавка, позапічна обробка, розливка металу, математичне моделювання.



Handwritten text at the top of the page, possibly a name or title, which is mostly illegible due to fading and blurring.

44694

AB 33.555  
**AB 33.555**