

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

САФОНОВ ВОЛОДИМИР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 669.046.5:669.18.013.252

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОВШОВОЇ ОБРОБКИ
В СТАЛЕЛИВАРНОМУ МОДУЛІ**

Спеціальність 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів
та спеціальних сплавів»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Донецьк – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Смірнов Олексій Миколайович,
Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» (м. Донецьк), завідувач кафедри «Металургія сталі».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дюдкін Дмитро Олександрович,
ВАТ «Завод універсальне обладнання» (м. Донецьк), заступник генерального директора з нової техніки і технології;

доктор технічних наук, професор
Харлашин Петро Степанович,
Приазовський державний технічний університет (м. Маріуполь), завідувач кафедри «Металургія сталі»;

доктор технічних наук, доцент
Григор'єв Станіслав Михайлович,
Запорізький національний технічний університет (м. Запоріжжя), завідувач кафедри «Економіка і організація виробництва».

Захист відбудеться 22 квітня 2010 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.01 Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, I навчальний корпус, малий актовий зал.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, II навчальний корпус.

Автореферат розісланий 18 березня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 11.052.01, д.т.н., проф.



О. В. Яковченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Світове сталеплавильне виробництво протягом останніх двох десятиліть зазнало системної трансформації, яка забезпечила значний енерго- і ресурсозберігаючий ефект у сукупності з підвищенням конкурентоспроможності металопродукції. Перш за все, це відноситься до розвитку сучасної концепції виплавки сталі, яка переросла з циклу технологічних операцій в одному агрегаті в потоковий багатоагрегатний процес. На базі сучасної схеми виробництва сталевих заготовок (литий сляб, сортова заготовка, блюм і ковальський злиток) було створено сталеливарний модуль - високопродуктивну, компактну й універсальну технологічну ланку із сталою структурою (виплавка вуглецевого напівпродукту – ковшова обробка – розливання сталі) і агрегатною побудовою, що включає електродугову піч (кисневий конвертер), агрегат ківш-піч, вакууматор і МБЛЗ (розливання крупних злитків).

Чорна металургія України входить до групи лідерів за об'ємом виробництва й експорту сталі у світі, що стимулює вдосконалення та адаптацію технологічних схем металургійних підприємств, які діють, до потреб світового ринку. У таких умовах процес «вростання» нових технічних та технологічних рішень і, перш за все ковшової обробки сталі, ускладнюється, оскільки вимагає індивідуального і зваженого підходу, пов'язаного з оптимізацією поєднання робочих параметрів агрегатів і комплексної дії фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних підпроцесів поєднаної енерго- і ресурсозберігаючої технології. Більш того, на заводах, стратегія яких повністю або частково відповідає спеціалізації виробництва, концепція ковшової обробки спрямована на розширення технологічних можливостей агрегатів. Ця обставина визначає основний комплекс завдань, які вимагають вирішення на етапі проектування і реалізації технології ковшової обробки сталі при реконструкції спеціалізованих сталеплавильних цехів.

Під час аналізу сучасних методик і результатів досліджень процесів ковшової металургії встановлено, що для організації розробки вітчизняних зразків техніки в комплексі з технологією для багатофункціональних технологічних модулів спеціалізованих металургійних міні заводів низка запитань вивчена недостатньо повно і не має надійної вітчизняної наукової бази. У зв'язку із цим, актуальність представленої дисертаційної роботи обумовлена сучасним станом розвитку теорії, техніки і технології ковшової обробки сталі і необхідністю вирішення науково-технічної проблеми проектування вітчизняних конкурентоздатних технологічних схем і агрегатів, їх освоєння і експлуатації, а також експертизи зразків устаткування, що імпортують.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати роботи направлені на вирішення завдань, поставлених у Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року (постанова обласної Ради від 22.03.2002 р. № 3/25-656). Матеріали дисертаційної роботи є узагальненням наукових результатів, отриманих автором при виконанні науково-дослідних робіт, проведених у Державному вищому навчальному закладі (ДВНЗ) «Донецький національний технічний університет»: «Оптимізація сполучених процесів гомогенізації сталі на всіх етапах позапічної обро-

бки з метою ресурсо- та енергозбереження» (номер державної реєстрації 0107U003022), «Аналіз і розробка принципів вирішень реконструкції сталеплавильного виробництва ВАТ «Енергомашспецсталь» і визначення технічних і технологічних параметрів комплексу нового устаткування»; у НВО «Донікс»: «Розробка комплексу технологічних рекомендацій позапічної обробки колесної сталі із застосуванням установки ківш-піч і вакууматора», «Базисний інжиніринг «Технологія виплавки сталі на комплексі ДСП – УКП - VD». Автор дисертації - відповідальний виконавець робіт.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вдосконалення технології рафінування і нагрівання металу під час ковшової обробки в межах сучасного сталеливарного модуля спеціалізованого металургійного міні заводу шляхом раціонального поєднання робочих параметрів агрегатів і комплексної дії фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних підпроцесів поєднаної енерго- і ресурсозберігаючої технології. Дисертація направлена на розробку нових теоретичних уявлень про процеси вторинного окиснення, десульфурації металу, взаємодії електричної дуги з поверхнею рафінувального шлаку при перемішуванні розплаву інертним газом, поведінки малозалізного шлаку в сталерозливному ковші при вакуумній обробці для створення сучасних зразків вітчизняного обладнання в комплексі з технологією ковшової обробки сталі.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання теоретичних, експериментальних і промислових досліджень:

- виконати аналіз тенденцій розвитку і вдосконалення сучасної концепції виплавки вуглецевого напівпродукту і ковшової обробки сталі в напрямку енерго- і ресурсозберігання і виявити загальні проблеми розробки і організації технології ковшової обробки в межах сталеливарного модуля спеціалізованого заводу;
- на основі методів фізичного моделювання провести дослідження впливу розташування продувальних вузлів (пробок), інтенсивності введення інертного газу, рівня наливання металу в ковші на тривалість усереднювання при продуванні розплаву інертним газом;
- шляхом удосконалення методів фізичного моделювання розробити модель і вивчити гідродинамічну картину поведінки рафінувального шлаку залежно від витрати газу, кількості продувальних вузлів і їх розташування в днищі сталерозливного ковша при продуванні інертним газом;
- розробити методіку проведення експерименту в промислових умовах і виконати дослідження процесів взаємодії рафінувального шлаку і металу в сталерозливному ковші під час екстракційного рафінування сталі в агрегаті ківш-піч і камерному вакууматорі;
- виконати термодинамічну оцінку впливу прямого і зворотного емульгування на межі шлак-метал на потенційні можливості десульфурації сталі в сталерозливному ковші;
- на базі розвитку можливостей математичного моделювання за допомогою стандартного пакету прикладних програм ANSYS і в промислових умовах провести дослідження впливу параметрів електричної дуги, введення іне-

ртного газу і товщини рафінувального шлаку в сталерозливному ковші на показники нагріву металу в агрегаті ківш-піч;

- розробити методику і провести порівняльний аналіз ефективності вживання електричної і хімічної енергії під час двостадійного нагріву ванни розплаву в дуговій сталеплавильній печі та в агрегаті ківш-піч;

- упровадити результати наукових досліджень в процесі проектування і введення в експлуатацію вітчизняних технологій і промислових агрегатів ковшової обробки сталі для обґрунтування і розрахунку тривалості технологічних операцій, а також роботи устаткування в комплексі з плавильними агрегатами і розливанням, технологічних режимів нагріву і рафінування сталі, у поєднанні з робочими параметрами агрегатів (електричні характеристики робочих ступенів пічного трансформатора, висота вільного борту сталерозливного ковша, розташування продувних пробок і зон введення добавок і розкислювачів), розробки технологічних інструкцій і навчання персоналу.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес ковшової обробки розплаву в сталеливарному модулі.

Предмет дослідження. Технологічні схеми сталеливарного модуля. Закономірності процесів усереднювання, нагріву і рафінування сталі. Елементи процесу формування заданих властивостей рідкої сталі і виробничих показників агрегатів шляхом поєднання комплексу фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних підпроцесів з робочими параметрами агрегатів.

Методи дослідження. Для досягнення мети роботи були застосовані сучасні розрахункові і експериментальні методи досліджень фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних процесів ковшової обробки сталі. Загальна методика досліджень ґрунтується на методології системного аналізу, при цьому були використані методи кінцевих елементів і планування експерименту, а також теорії подібності. Дослідження виконані з урахуванням основних положень теорії металургійних процесів, фізико-хімічної механіки сталеплавильних процесів і теорії теплопровідності. Для дослідження якості сталі застосовували сучасні промислові прилади і установки. Моделювання гідродинамічних і теплофізичних процесів ковшової металургії і статистична обробка даних проведено із застосуванням ПЕОМ.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розвинуто методологію поєданого проектування технології і робочих параметрів агрегатів ковшової металургії, яка ґрунтується на принципах системного аналізу, і спрямована на забезпечення заданої продуктивності і якості рідкої сталі в межах сучасного сталеливарного модуля металургійного міні заводу.

Показано, що певна зовнішня технологічна дія, спрямована на посилення домінуючого підпроцесу, спричиняє зміну ходу паралельних і послідовних підпроцесів у системі сталеливарного модуля. Розробка відрізняється кількісним порівнянням однаковоякісних альтернативних варіантів стану рідкої сталі з урахуванням спільної реакції на зовнішню технологічну дію фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних підпроцесів. Встановлені основні напрями оптимізації зовнішньої технологічної дії шляхом зміни робо-

чих параметрів агрегатів на етапі поєднаного проектування технології і устаткування ковшової металургії.

2. Вперше показано, що причиною відхилення фактичного коефіцієнта розподілу сірки між шлаком і металом від рівноважного при високій інтенсивності продування аргонем в агрегаті ківш-піч є локальне підвищення окисленості шарів металу, що контактують зі шлаком.

Встановлено, що зростання швидкості масопередачі кисню на межу шлак-метал обумовлений окисленням струменевих крапель сталі в робочому просторі агрегата ківш-піч, які утворюються при розриві міхурів аргону над поверхнею оголеного металу, і перенесенням оксиду заліза через шар шлаку краплями сталі, які рухаються під дією сили тяжіння. Процес підвищення швидкості масопередачі кисню до сталі набуває розвитку при питомій інтенсивності продування на одну продувальну пляму ($q, л/(хв \times m)$) більше ніж $q = 5,69 \times m^{-0,18} \times \delta$ (тут m – маса металу в сталерозливному ковші, т; δ – товщина шару шлаку, м). Показано, що з метою запобігання вторинного окислення сталі в агрегаті ківш-піч при перемішуванні інертним газом через два продувальні вузли необхідне регулювання витрати газу на кожен з них. На початку обробки при малій товщині шару шлаку через один із продувальних вузлів доцільно подавати до 90% загальної кількості аргону. Після збільшення кратності шлаку до 1,5% і більш через кожен з продувальних вузлів слід подавати рівну кількість газу.

3. Вперше експериментально в промислових умовах встановлено залежність об'єму шлакової піни, що утворюється при вакуумуванні сталі в ковші, від основності малозалізного шлаку.

Результати отримані при вмісті алюмінію в рідкій сталі 0,007 - 0,047% і характеризуються урахуванням впливу товщини малозалізного рафінувального шлаку, а також концентрації водню в ньому. Встановлено, що при досягненні тиску у вакуумкамері 20 - 10 кПа інтенсивність спінювання шлаку, головним чином, визначається вмістом в ньому водню. При цьому питома швидкість виділення газу з шлаку з вихідним вмістом водню 28 - 42 ppm збільшується прямо пропорційно до його концентрації і складає 0,19 - 0,29 м³/(т × с).

4. Набули подальшого розвитку уявлення про вплив розташування продувальних вузлів на час повного перемішування розплаву інертним газом.

Встановлено, що в разі вживання двох продувальних вузлів і рівної витрати газу на кожному з них мінімальний час перемішування досягається при розташуванні їх по дузі радіусом 0,4 - 0,6 радіусу днища ковша, коли центральний кут між ними не перевищує 90 - 100°. При дотриманні цієї умови зміна взаємного розташування продувальних вузлів не спричиняє помітну зміну часу перемішування.

5. Вперше показано, що при нагріванні розплаву електричною дугою в агрегаті ківш-піч розташування продувальних вузлів у днищі сталерозливного ковша істотним чином впливає на характер зміни середньої температури металу.

Встановлено, що характер зміни середньої температури металу в інтервалі розташування продувальних вузлів $r_{np}/R_{ковш} = \rho_{np} = 0,38 - 0,76$ істотно

змінюється залежно від питомої інтенсивності витрати інертного газу для перемішування розплаву. Показано, що зсув продувального вузла до центру днища сталерозливного ковша підсилює вплив величини витрати інертного газу на швидкість підвищення середньої температури розплаву. При цьому збільшення питомої інтенсивності продування з 0,3 до 2,0 л/(мин×т) призводить до зниження швидкості нагріву більш, ніж в три рази для $\rho_{np} = 0,38$ і в 1,2 рази для $\rho_{np} = 0,76$. Незалежно від розташування продувальних вузлів помітного зниження максимальної швидкості нагріву при продуванні аргоном з питомою інтенсивністю від 0,5 до 1,0 л/(хв×т) не спостерігається. При цьому встановлено, що стабільне горіння і максимальний тепловий коефіцієнт корисної дії електричної дуги в агрегаті ківш-піч можуть бути досягнуті при товщині шару шлаку під лункою дуги 20 - 30 мм і відстані нижнього торця графітованого електроду над поверхнею шлаку близько 25 мм.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені алгоритми оцінки ефективності використання електричної енергії і тепла хімічних реакцій, які протікають на етапі нагріву рідкої ванни у високопродуктивній дугової сталеплавильній печі при спільному інжектванні вуглецевмісного порошку і кисню у високоокислений шлак. Отримані результати дозволяють виконувати аналіз і вдосконалення енергетичного режиму завершальної стадії плавки на підставі величини міри допалювання оксиду вуглецю в робочому просторі печі, а також визначати оптимальну температуру випуску залізовуглецевого напівпродукту залежно від стратегії сталеливарного модуля.

Розроблено критерії обґрунтування елементів технології і робочих параметрів агрегатів ковшової обробки сталі, до яких належать: визначення оптимальної витрати інертного газу для нагріву, перемішування і десульфурації сталі, вибору кількості і розміщення продувальних вузлів в днищі сталерозливного ковша, оптимальних робочих параметрів пічного трансформатора і електричної дуги, оцінка розміру вільного борту ковша, кількості рафінувального шлаку і маси плавки, а також тривалості технологічних операцій з урахуванням їх швидкості і проміжного стану.

Доведено до рівня промислового вживання такі розробки:

- загальна концепція побудови, визначення раціональних шляхів реконструкції електросталеплавильного цеху ВАТ «Енергомашспецсталь» (м. Краматорськ, Україна) з метою збільшення об'єму виплавки сталі до 240 тис. т на рік і виробництва крупних злитків масою 360 т, а також реструктуризація мартенівського способу виробництва металу в сталеливарному цеху ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ, Україна);

- проектування елементів наскрізної технології ковшової обробки сталі для виробництва залізничних коліс і її промислові випробування, розрахунок основних робочих параметрів агрегата ківш-піч і камерного вакууматора (місткість сталерозливного ковша 110 т) для умов мартенівського цеху ВАТ «Виксунський металургійний завод» (р. Вика, Нижньгородської обл., Росія);

- проектування елементів наскрізної технології позапічної обробки сталі для виробництва крупного злитка і її промислові випробування, розрахунок основних технічних параметрів агрегату ківш-піч і камерного вакууматора

(місткість сталерозливних ковшів 100/60 т) в умовах електросталеплавильного цеху ВАТ «Енергомашспецсталь»;

- визначення раціональних параметрів продування металу аргоном при обробці в агрегаті ківш-піч у перехідний період реконструкції сталеплавильного переділу ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» з метою підвищення ефективності рафінування і зниження зносу футерівки ковша.

Розроблені вітчизняні зразки техніки і технології ковшової обробки сталі на сьогоднішній день успішно експлуатують у сталеплавильних цехах в умовах потокового виробництва.

Крім того, до технологічних розробок, виконаних автором в рамках тендерних техніко-комерційних пропозицій ЗАТ «НКМЗ», які розглядалися підприємствами-замовниками разом із пропозиціями компаній, що ведуть у металургійному машинобудуванні (SMS Demag, Siemens-VAI, Danieli), слід віднести: окремі елементи технології виплавки, позапічної обробки і розливання трубної сталі для виробництва гарячекатаних рулонів в умовах ВАТ «Сталь» (Виксунський ливарно-прокатний комплекс); технологію ковшової обробки трубної сталі для виробництва листового прокату в умовах киснево-конвертерного цеху ВАТ «Азовсталь»; технологію ковшової обробки сталі, в т. ч. електротехнічної, для виробництва холоднокатаного листового прокату в умовах киснево-конвертерного цеху №1 ВАТ «Новолипецький металургійний комбінат»; технологію вакуумування сталі для виробництва холоднокатаного листового прокату в умовах киснево-конвертерного цеху ВАТ «Магнітогорський металургійний комбінат».

Опубліковані в монографіях і в науково-технічних періодичних виданнях наукові і прикладні результати, отримані автором при роботі над докторською дисертацією, а також розроблені з цією метою математичні і фізичні моделі застосовують при проведенні курсів підвищення кваліфікації інженерно-технічних працівників металургійних підприємств, а також сталеварів дугової сталеплавильної печі й агрегату ківш-піч, операторів вакууматора і МБЛЗ (ВАТ «Єнакіївський металургійний завод», ВАТ «Виксунський металургійний завод», ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», ВАТ «Донецьксталь - Металургійний завод», ВАТ «Енергомашспецсталь» і ВАТ «Макіївський металургійний завод»), а також в навчальному процесі під час проведення лекцій із загальних і спеціальних курсів «Високоєфективні процеси виробництва сталі», «Позапічна обробка чорних металів», «Виплавка сталі в подових агрегатах», виконанні лабораторних, курсових, дипломних і магістерських робіт студентами освітнього напрямку «Металургія» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».

Особистий внесок здобувача. Основні ідеї досліджень належать авторові дисертації. Створення нових технологічних схем сталеливарних модулів, розробка технологічних варіантів ковшової обробки, робочих параметрів агрегатів, методик досліджень, керівництво при їх проведенні, здобуття результатів і їх аналіз виконані автором. Автором розроблені і сформульовані положення пунктів наукової новизни.

У розробці ряду технічних рішень і їх реалізації, пуску технологічних агрегатів, а також проведенні гарантійних випробувань технології брали

участь співробітники ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», НВО «Донікс», ВАТ «Виксунський металургійний завод», ВАТ «Енергомашспецсталь» та інших підприємств, що знайшло відображення в спільних публікаціях.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і прикладні результати роботи доповідались і обговорювались на VII Всесоюзній науковій конференції «Современные проблемы электрометаллургии стали» (м. Челябінськ, 1990 р.); Міжнародній конференції сталеплавильників «Современное оборудование, технология внепечной обработки стали и непрерывного литья заготовок» (м. Єнакієво, 2003 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век» (м. Донецьк, 2004 р.); Науково-технічній конференції «МЕТАЛ-ФОРУМ Україна-2005» (м. Київ, 2005 р.); Восьмому конгресі сталеплавильників (м. Нижній Тагіл, 2004 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Современные технологии и оборудование для внепечной обработки и непрерывной разливки стали» (м. Москва, 2006 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век». (м. Донецьк, 2006 р.); Дев'ятому конгресі сталеплавильників. (р. Старий Оскол, 2006); 9th European Electric Steelmaking Conference (м. Краків, 2008 р.), X Міжнародному Конгресі сталеплавильників (м. Магнітогорськ, 2008 р.); засіданнях міжвідомчої науково-технічної ради при Національній академії наук України з проблем позапічної обробки і безперервного розливання.

На X Міжнародному Конгресі сталеплавильників доповідь «Современная электродуговая печь в составе сталелитейного цеха машиностроительного завода: основные параметры и концептуальные решения», підготовлена у співавторстві з працівниками ЗАТ «НКМЗ», визнана кращою і відзначена дипломом оргкомітету.

Публікації. Основні наукові положення дисертаційної роботи, результати досліджень, висновки і рекомендації автора опубліковані у 2 монографіях, 21 статті наукових журналів, 4 статтях збірників наукових праць, 2 авторських свідоцтвах СРСР, 1 патенті України. Без співавторів опубліковано 2 статті. У фахових виданнях ВАК України, опубліковано 23 статті.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 318 найменувань і 14 додатків. Повний обсяг дисертації складає 321 сторінку, загальний обсяг – 275 сторінок. У розділах дисертації є 116 рисунків і 71 таблиця (в тому числі на 46 окремих сторінках).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Сучасний стан системи технологій виробництва сталі і основні методи досліджень процесів ковшової металургії» розглянуто питання функціонування сталеливарного модуля (СЛМ), який може входити до складу виробничої лінії підприємства (інтегрований металургійний комбінат, ливарнопрокатний модуль, машинобудівний завод) або представ-

ляти автономну одиницю (металургійний міні завод). Показано, що агрегатний склад СЛМ не залежить від стратегії металургійного підприємства (мінімізація витрат, спеціалізація на випуску високоякісної продукції, фіксація сегменту ринку). У той же час, на заводах, стратегія яких повністю або частково спрямована на спеціалізацію виробництва, концепція ковшової обробки полягає в розширенні її можливостей за рахунок ефективного узгодження і перерозподілу технологічних операцій як в рамках агрегату, так і між ними. У цьому випадку лінійну технологічну схему СЛМ, яка характерна для стратегії мінімізації витрат, замінюють багатофункціональною модульною схемою спеціалізованого металургійного міні заводу. Тривалість кожної технологічної операції, їх проміжний і кінцевий результат неможливо організувати без оптимізації величини параметрів зовнішньої дії і оцінки їх різноспрямованого впливу на паралельні і послідовні значимі підпроцеси в системі. Ця обставина визначає основний комплекс завдань, які вимагають вирішення на етапі проектування і реалізації сучасної технології ковшової обробки сталі при реконструкції спеціалізованих сталеплавильних цехів, а також розширенні сортаменту в умовах поточного виробництва.

Огляд напрямків наукових досліджень у сфері ковшової обробки сталі засвідчив, що основна їх частина фокусується на вивченні кількісних характеристик перемішування розплаву, взаємодії металу і шлаку при продуванні інертним газом, екстракційного рафінування сталі під атмосферним тиском і під вакуумом, а також питаннях енергозбереження. Для досліджень широко застосовують комплексні методи фізичного і математичного моделювання, зокрема, водні моделі сталерозливного ковша, які є невід'ємною частиною сучасної методики проектування нових і оптимізації існуючих режимів ковшової обробки. При цьому сучасні наукові дослідження спрямовані на підвищення швидкості і глибини десульфурзації і дегазації сталі, а також точності методів оцінки параметрів розплаву як на кінцевій, так і на проміжних стадіях.

Під час аналізу сучасних методик і результатів досліджень ковшової обробки сталі встановлено, що для організації проектування вітчизняних зразків технології в комплексі з агрегатами для багатофункціональних модулів спеціалізованих металургійних міні заводів низка питань вивчена недостатньо повно, що викликало проведення додаткових досліджень.

У другому розділі *«Загальна методика і обґрунтування основних методів досліджень»* викладені принципи дослідження комплексного впливу зовнішніх технологічних дій на стан розплаву в сталерозливному ковші. Загальна методика дослідження процесів ґрунтується на методології системного аналізу, тобто кількісного порівняння однаковоякісних альтернативних варіантів. У технології виплавки сталі до зовнішніх технологічних дій, перш за все, слід віднести введення електричної і хімічної енергії, зміну шлакового режиму, продування розплаву інертним газом, обробку під вакуумом, а також введення феросплавів і розкислювачів. Технологічний ланцюжок може бути представлений сукупністю паралельних і послідовних підпроцесів, які виражаються в зміні температури і складу розплаву. У таких умовах конкретна зовнішня дія на систему в цілому супроводжується попутним впливом на

швидкість кожного підпроцесу. При цьому, у деяких випадках, зміна параметрів цільового підпроцесу шляхом організації певної зовнішньої дії супроводжується істотним впливом на хід сусідніх підпроцесів. Досвід проектування технології свідчить, що умови жорсткої регламентації тривалості ковшової обробки, як правило, входять у протиріччя і (або) вимагають оптимізації параметрів до яких, у першу чергу, слід віднести швидкість десульфурації і нагріву металу, видалення водню і сірки у вакуумі, температура випуску з плавильного агрегату і початку ковшової обробки, ступінь десульфурації при атмосферному тиску і під вакуумом, а також тривалість набору вакууму і вакуумування.

На першій стадії реалізації загальної методики системного аналізу (складання об'єктивної оцінки кожного підпроцесу) на підставі застосування методів фізичного і математичного моделювання, а також промислового експерименту вивчений вплив зовнішньої технологічної дії на кожний із підпроцесів окремо.

Фізичне моделювання проведене на прозорій водній моделі сталерозливного ковша, діаметром 0,24 м і заввишки 0,36 м з продуванням повітрям з витратою 0,1 - 1,0 л/хв, що відповідає промисловим витратам для 100-тонного сталерозливного ковша 6 – 60 м³/ч відповідно. Шлаковий шар моделювали силіконовим маслом завтовшки від 5 до 20 мм. Як критерій, за яким кількісно оцінювали поведінку шлакової фази, використовували величину площі оголення поверхні «металу» в зоні виходу газового струменя при продуванні. Для визначення кількісних характеристик крапель, що виносять газові міхури, застосовували пористі елементи, які розташовували паралельно площі дзеркала рідини. Спостережувані процеси перемішування записували за допомогою цифрової відеокамери.

Фіксацію стану металу і шлаку в області барботажу проводили за допомогою пробовідбірника спеціальної конструкції (Пат. 40737 UA, МПК С 21 С 5/00. Пристрій для відбору проби розплаву з металургійної ємності) (рис.1).

Частини шлакової проби розмелювали для магнітної сепарації. Після вагового аналізу виділену металеву фракцію досліджували для оцінки кількості, форми і розмірів часток за допомогою оптичного мікроскопа.

Завдання дослідження характеру руху газорідинних потоків, розподіли полів швидкостей і температури розплаву при перемішуванні вирішено із застосуванням математичного моделювання в рамках прикладного пакету ANSYS/FLOTRAN, що реалізовує метод кінцевих елементів. Математичні

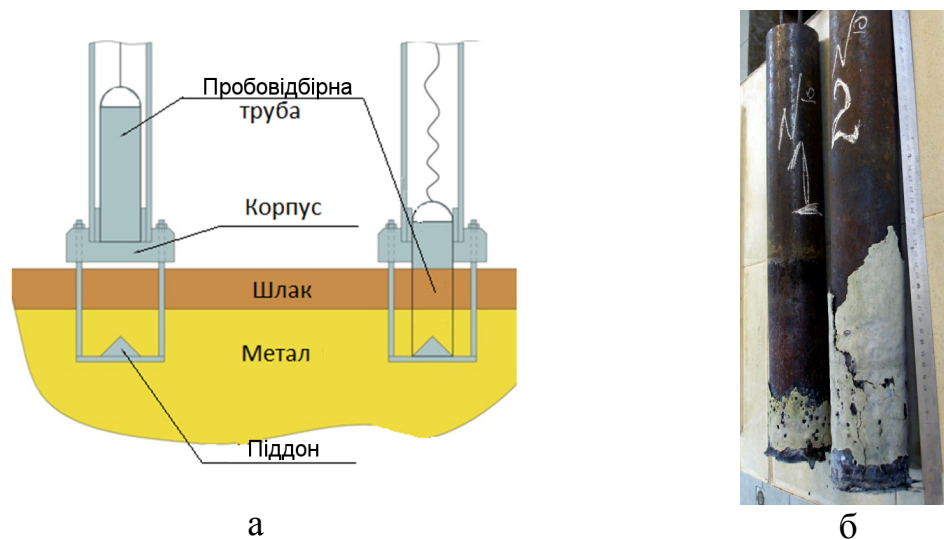


Рис. 1. Схема відбору проб (а) і вигляд пробовідбірних труб після відбору проб металу і шлаку (б)

моделі враховували явища теплопередачі між розплавом, футерівкою ковша, шлаком під час нагріву електричною дугою, інтенсивність продування інертним газом, а також розміщення продувальних елементів у днищі сталерозливного ковша. Прийняті наступні початкові і граничні умови: початкова температура розплаву (при $\tau = 0$ хв) складає 1540°C , швидкість рідкого розплаву на межі зі стінками ковша, окрім зони продувальної пробки дорівнює нулю, товщина шару шлаку змінюється в межах 100 – 200 мм. Об'ємна витрата вдуваного газу - від 0,1 до 1,0 $\text{м}^3/\text{хв}$, при діаметрі продувальної пробки 100 мм. Тривалість продування в кожному з дослідів склала 10 хв.

Розроблені методики виміру швидкості десульфурзації і питомих показників нагріву металу, а також витрати електроенергії застосовували в ході гарантійних випробувань у промислових умовах.

Друга стадія реалізації загальної методики полягала в оцінюванні дії Q на кінцевий, в заданому тимчасовому інтервалі ($\Delta\tau$), результат.

Середні швидкості підпроцесу S і паралельного значимого підпроцесу T виражені як:

$$V_S = \frac{\Delta S}{\Delta\tau}; \quad (1) \quad V_T = \frac{\Delta T}{\Delta\tau}, \quad (2)$$

де V_S - швидкість підпроцесу S ; V_T - швидкість підпроцесу T ; ΔS - зміна параметра S в ході підпроцесу S ; ΔT – зміна параметра T в ході підпроцесу T .

На підставі застосування наведених вище методик досліджень підпроцесів S і T залежність зовнішньої дії чинника Q на середню швидкість кожного з них складає:

$$V_S = f_S(Q); \quad (3) \quad V_T = f_T(Q). \quad (4)$$

Зміна значень параметра S в ході підпроцесу S і параметра T в ході підпроцесу T за час $\Delta\tau$ дорівнює відповідно:

$$\Delta S = f_S(Q) \cdot \Delta \tau; \quad (5) \quad \Delta T = f_T(Q) \cdot \Delta \tau. \quad (6)$$

Виразення факторіалу із заданими параметрами ΔS_0 і ΔT_0 має вигляд:

$$\varphi = [|(f_S(Q) \cdot \Delta \tau - \Delta S_0) \cdot m_S| + |(f_T(Q) \cdot \Delta \tau - \Delta T_0) \cdot m_T|] \rightarrow \min, \quad (7)$$

де m_S і m_T – коефіцієнти значущості.

Для визначення оптимальної альтернативи зв'язані між собою технологічною дією підсистеми аналізували сімплексним методом з обмеженнями на змінні за допомогою програми нелінійної оптимізації GRG2 Microsoft Office Excel.

У третьому розділі «Фізичне моделювання процесів перемішування розплаву в сталерозливному ковші» представлені результати досліджень процесів усереднювання ванни, поведінки шлакової фази і винесення крапель рідини при продуванні інертним газом через один і два продувальні вузли.

Результати експериментів усереднювання рідини в ковші при продуванні за допомогою двох продувальних вузлів представлені на рис. 2. Для визначення часу усереднювання при продуванні рідкої ванни ковша двома продувальними вузлами отримана наступна залежність:

$$\tau_m = 8,1 - 3,44 \cdot Q + 43,32 \frac{H}{D} - 2,5 \cdot \rho_{np} - 0,083 \cdot \alpha - 16,875 \cdot Q \cdot \frac{H}{D} + 0,094 \frac{H}{D} \cdot \alpha. \quad (8)$$

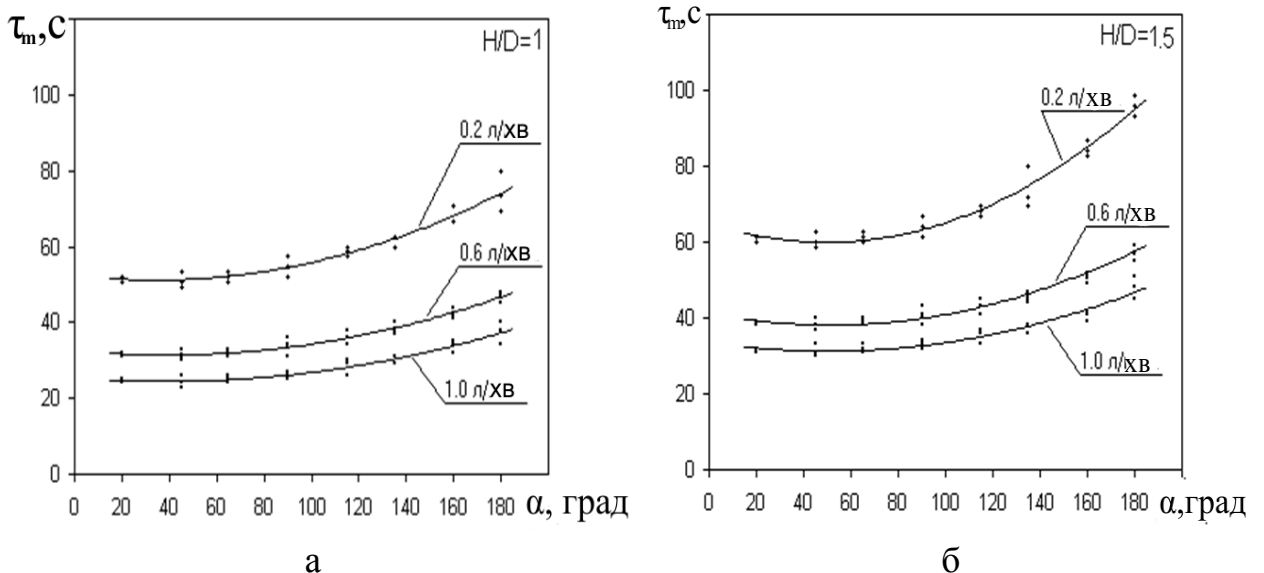


Рис. 2. Зміна часу гомогенізації (τ_m) залежно від кута між продувальними вузлами (α) і витратою газу (Q) для різного рівня рідини (відношення висоти H до діаметру ванни D): а) $H/D=1$; б) $H/D=1,5$

Встановлено, що при збільшенні кута між продувальними вузлами спостерігається деяке зростання часу гомогенізації, яке досягає свого максимального значення при діаметральному розташуванні пробок. Зростання величини часу гомогенізації при збільшенні величини кута між продувальними

вузлами більшою мірою виявляється для ковшів з підвищеним співвідношенням H/D , при цьому мінімальний час гомогенізації відзначено для розташування продувальних вузлів, коли центральний кут між ними знаходиться в діапазоні $20-100^\circ$.

Результат оцінки впливу кількості продувальних вузлів і їх розташування представлений у вигляді відношення сумарної площі оголення «металу» від товщини «шлаку» при продуванні з різною витратою газу (рис.3).

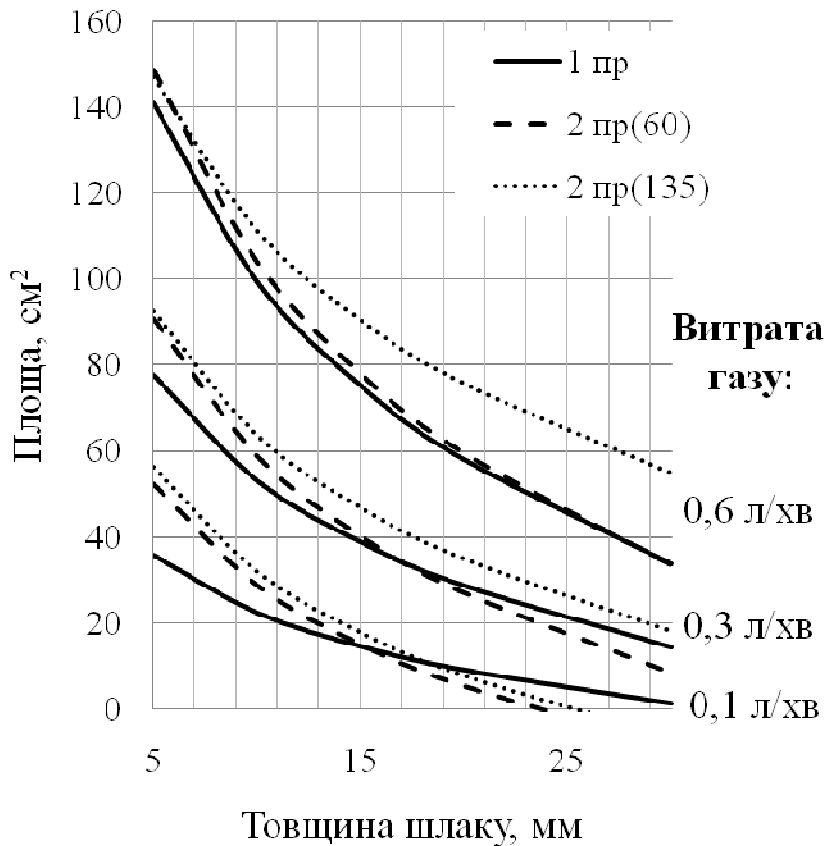


Рис. 3. Зміна площі оголення «металу» при продуванні

Збільшення витрати продувального газу до 0,6 л/хв призводить до того, що площі зон оголення для режиму продування однією пробкою і двома (60°) стають рівні, оскільки газові струмені близькорозташованих пробок об'єднуються. При цьому в результаті вживання режиму продування віддаленими одна від одної пробками (135°) через утворення двох зон виходу газу площа оголення збільшується на 30%.

Шляхом дослідження процесу винесення крапель унаслідок розриву газових міхурів встановлено, що максимальна їх маса доводиться на периферійну зону продувальної плями, що зумовлене переміщенням міхурів, які не розірвалися, в радіальному напрямі від центру продувальної плями в циркуляційних потоках рідини (рис. 4а).

Оцінка маси крапель металу, які утворюються при розриві газових міхурів у промислових 75, 150 і 300-тонних сталерозливних ковшах, проведена на підставі результатів холодного моделювання, засвідчила, що масштабний

Встановлено, що при тонкому шарі «шлаку» в разі продування через одну пробку, площа оголення «металу» на 30-35% менша при низькій (0,1 л/хв) і на 5-10% при високій (0,6 л/хв) витраті газу. У той же час, при збільшенні товщини шару «шлаку» вживання двох продувальних пробок дозволяє уникнути оголення «металу». Розділення одного газового струменя на дві рівні частини при малій витраті продувального газу не дозволяє кожній з них порушити суцільність верхнього шару масла.

чинник здійснює найбільш сильний вплив на швидкість винесення крапель сталі газовими мішурами (рис. 4б).

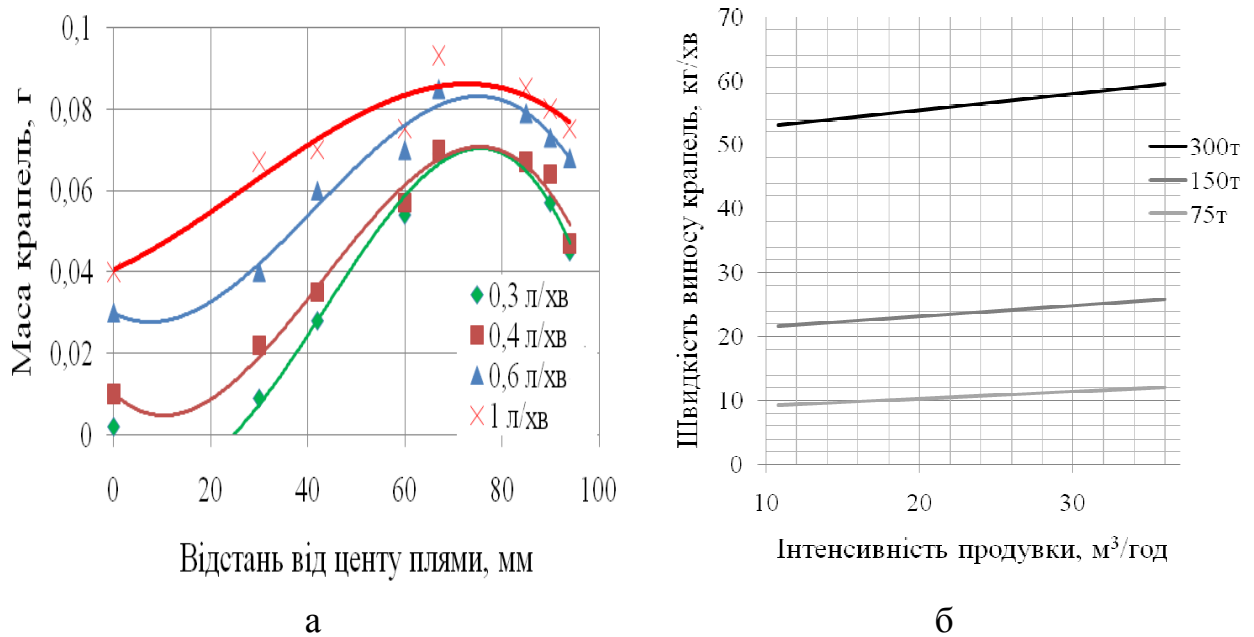


Рис.4. Розподіл крапель рідкої фази залежно від відстані до центру продувальної плями (а) і оцінка швидкості винесення металу при розриві газових міхурів (б)

Приймаючи тривалість витання часток металу в шлаку рівною 6 с, показано, що їх загальна маса в промисловому ковші, складає 0,2% маси шлаку.

У четвертому розділі «Дослідження особливостей протікання ковшових процесів екстракційного рафінування сталі» стосовно обробки сталі в 300-тонному сталерозливному ковші ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» проведено порівняльний аналіз результатів десульфурації металу рафінувальним шлаком в агрегаті ківш-піч (АКП) і камерному вакууматорі.

Показано, що розрахункові значення коефіцієнта розподілу сірки з врахуванням рівноваги кисню і алюмінію в об'ємі металу після закінчення десульфурації в агрегаті ківш-піч істотно перевищують фактичні. У той же час встановлено, що найбільш близькі до розрахункових значень коефіцієнта розподіли сірки між шлаком і металом досягнуті після обробки розплаву в камерному вакууматорі, у середньому, 304 проти 260 відповідно (рис. 5).

Для дослідження підпроцесу ковшової десульфурації сталі проби розплаву з 300-тонного сталерозливного ковша в АКП і після вакуумування відібрані спеціальним пробовідбірником при інтенсивності продування інертним газом від 100 до 600 л/хв. Конструкція двопозиційного агрегата ківш-піч ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» дозволяє знизити до мінімуму паузу між закінченням нагріву розплаву і відбором проби.

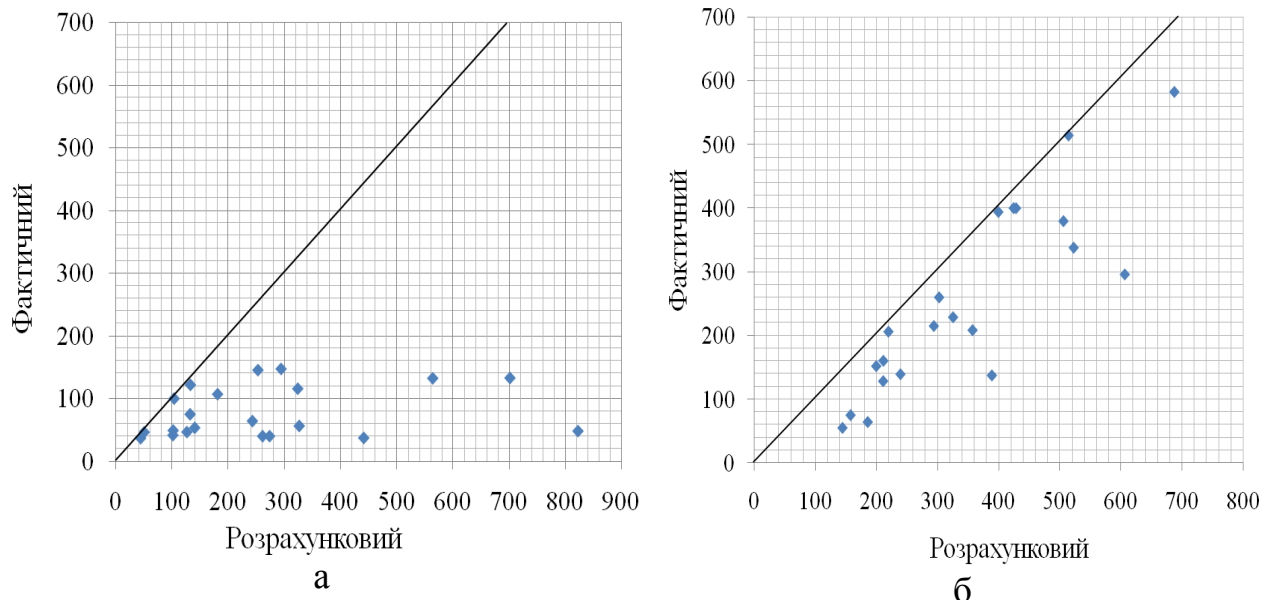
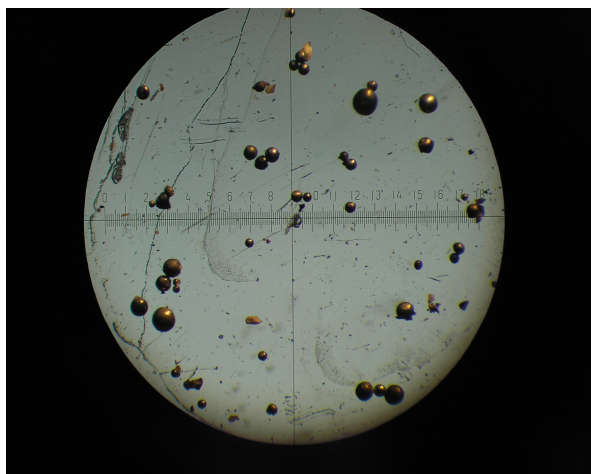
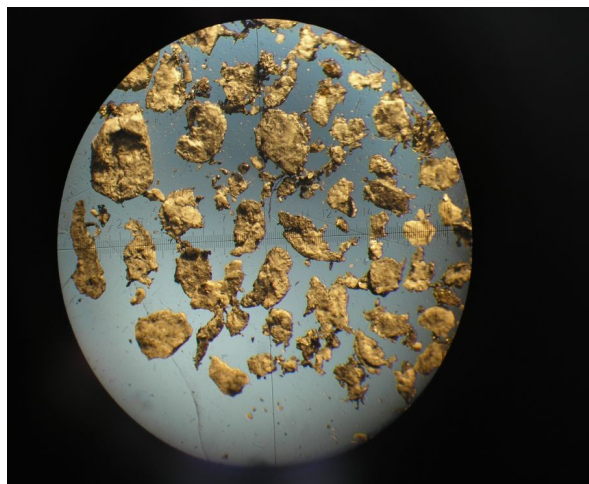


Рис. 5. Взаємозв'язок фактичного і розрахункового коефіцієнтів розподілу сірки між шлаком і металом в кінці обробки сталі в агрегаті ківш-піч (а) і після вакуумування (б)

Кількісний аналіз часток металу в шлаку показав, що на всіх горизонтах шлакової частини проб присутні дрібні частки сферичної форми, розміри яких складають від 50 до 270 мкм (рис. 6а). У той же час, при високій інтенсивності продування (500-600 л/хв), разом із сферичними частками в значно більшій кількості (приблизно у 4-5 разів) присутні металеві частки у формі пластівців, які мають окислену поверхню і розміри в поперечному перетині від 150 - 500 мкм до 4,0 - 6,4 мм (рис. 6б).



а



б

Рис. 6. Мікрознімки металевих крапель:
а - сферичні краплі; б - краплі у формі пластівців

Грунтуючись на аналізі форми, будови і фракційного складу пластівце-подібних часток сталі у шлаку встановлено, що їх походження пов'язане з утворенням струменевих крапель металу внаслідок розриву міхурів аргону в зоні виходу газового струменя при недостатній товщині шару покривного

шлаку. Таким чином, при високій інтенсивності продування розплаву у сталерозливному ковші, процес прямого емульгування металу в шлак, необхідно розглядати з врахуванням таких послідовних стадій:

1. При підвищенні інтенсивності продування розплаву газом на дзеркалі розплаву утворюється зона оголення сталі – «розплющене око».

2. Після розриву металеві оболонки газових міхурів на поверхні «розплющеного ока» відбувається винесення струменевих крапель металу в робочий простір агрегату, при цьому струменеві краплі набувають руху в радіальному напрямі, тобто до шару шлаку.

3. У разі контакту металевих крапель з окислювальною атмосферою відбувається окислення їх поверхні.

4. Падіння окислених крапель металу на поверхню шлакової фази призводить до їх деформації. Подальший рух окислених часток металу в шлаку під дією сил гравітації закінчується на міжфазній межі шлак-метал.

В результаті розчинення оксидної плівки крапель металу відбувається підвищення вмісту кисню на межі шлак-метал. У металевій частині проби, відібраної при високій інтенсивності продування аргонном, вміст алюмінію склав 0,002 проти 0,005% в об'ємних шарах ковша. Нижче представлені результати розрахунку вмісту кисню і коефіцієнтів розподілу сірки між шлаком і металом, яке виконано з врахуванням середнього складу розплаву в ковші (табл. 1а), середнього складу відібраної проби з розрахунком активності кисню в рівновазі з алюмінієм (табл. 1б) і середнього складу відібраної проби, у тому числі загальної концентрації кисню (табл. 1в).

Таблиця 1

Значення фактичного і розрахункового коефіцієнтів розподілу сірки

Варіант	Температура сталі, °С	Вміст алюмінію в сталі, %	Вміст кисню, %	Оптична основність шлаку	Розрахункова активність сірки в сталі	Фактична концентрація сірки в сталі %	Розрахунковий коефіцієнт розподілу	Фактичний коефіцієнт розподілу
а	1569	0,005	0,00058	0,7749	0,0090	0,009	129	55
б	1569	0,002	0,00106	0,7749	0,0079	0,008	68	62
в	1569	0,002	0,00130	0,7749	0,0090	0,009	56	56

Встановлено, що задовільний результат розрахунку рівноважного коефіцієнта розподілу сірки між шлаком і металом може бути отриманий із застосуванням фактичної величини концентрації кисню в сталі на міжфазній межі шлак-метал або із застосуванням розрахункової величини рівноважної концентрації кисню з алюмінієм, вміст якого визначено на міжфазній межі (табл. 1, варіант б і в).

На основі запропонованого механізму взаємодії металу і шлаку при перемішуванні інертним газом сформульований принцип організації процесу екстракційного рафінування шлаком під атмосферним тиском, який полягає в наявності критичної величини питомої інтенсивності продування на одну продувальну пляму (q , л/(хв \times m)), перевищення якої призводить до погіршення умов десульфурації

$$q = 5,69 \times m^{-0,18} \times \delta, \quad (9)$$

де m – маса металу в сталерозливному ковші, т; δ – товщина шару шлаку, м.

Металографічні дослідження металеві частини проб дозволили встановити присутність сферичних шлакових крапель у металевій фазі, найбільш великі з яких мають діаметр до 50-60 мкм. Оцінка показала, що швидкість видалення сірки з металу краплями сталі в шлаку для умов 300-тонного сталерозливного ковша не перевищує 0,006, а краплями шлаку - 0,013 ppm/хв. Сумарна швидкість десульфурації внаслідок розвитку процесів прямого і зворотного емульгування складає близько 0,019 ppm/хв, що в 100 – 500 разів нижче від фактичної в промислових агрегатах. В результаті досліджень встановлено, що явище емульгування має місце в промисловому сталерозливному ковші, проте його вплив на швидкість десульфурації дуже незначний.

Тривалість камерного вакуумування сталі, що розкислена, збільшується через неконтрольоване спінювання шлаку при проходженні тиску близько 200 - 300 мбар. При цьому управління процесом набору вакууму переводять в ручний режим з періодичним підвищенням тиску у вакуумкамері.

З метою визначення безпечної величини вільного борту сталерозливного ковша, товщини і основності рафінувального шлаку розроблена математична модель. Результати розрахунку представлені на рис. 7.

В основу моделі покладена величина швидкості утворення газу ($Q_{газ}$, м³/с), яка визначена під час промислових досліджень вакуумування сталі, що розкислена алюмінієм (0,007 - 0,047%), шляхом виміру тривалості спінювання шлаку до рівня торця борту сталерозливного ковша. Емпірична залежність швидкості утворення газу від основності шлаку ($B = 2,7-3,8$) представлена нижче:

$$Q_{газ} = 0,5661 \times B - 1,0808. \quad (R^2 = 0,8323). \quad (10)$$

Показано, що швидкість утворення газу і, відповідно, товщина шлакової піни суттєво залежить від основності шлаку в сталерозливному ковші і визначається, головним чином, вмістом в ньому водню. При цьому питома швидкість виділення газу зі шлаку з початковим вмістом водню 28-42 ppm

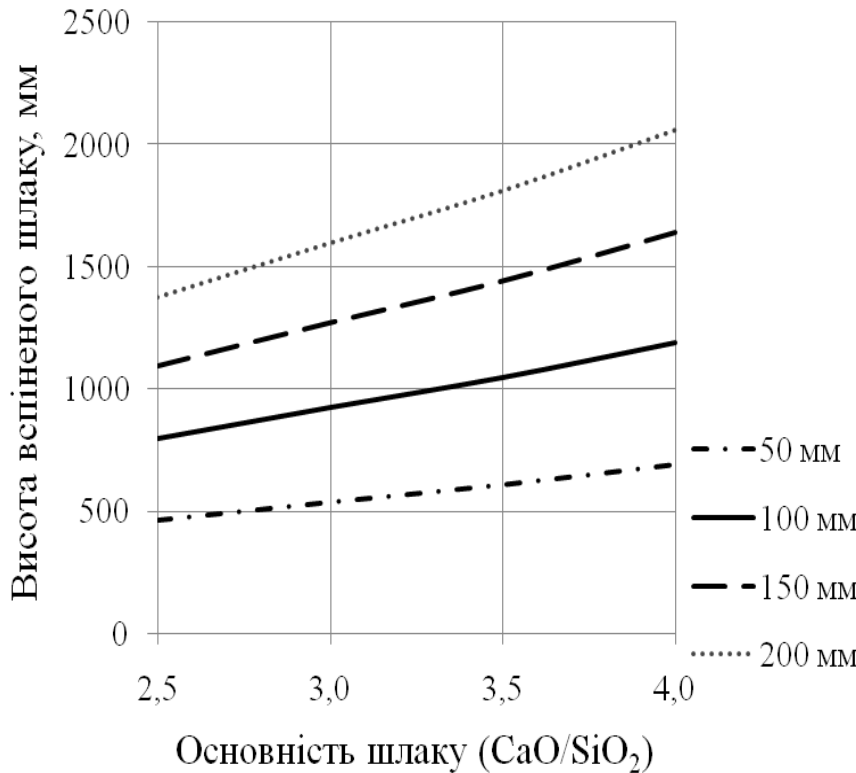


Рис.7. Оцінка залежності висоти шлакової піни від основності і товщини шару рафінувального шлаку при тиску 200 мбар.

Вики проведені порівняльні дослідження швидкості нагріву металу, питомої витрати й ефективності використання теплової енергії в ДСП класичної і сучасної конструкцій, а також в агрегаті ківш-піч. Встановлено, що в ДСП-50 класичній конструкції ВАТ «Енергомашспецсталь» при середній швидкості нагріву розплаву, рівній 5,04 К/хв, питома витрата електроенергії складає 0,66 кВт×год/(т×К), а частка корисної енергії, що йде на нагрів рідкої сталі, становить 34,85%. Аналогічні дослідження були проведені в ДСП-120 «Danieli» ММЗ «Істил-Україна» з пічним трансформатором потужністю 63 МВА. Результати експерименту показали, що при середній швидкості нагріву рідкої сталі, рівної 10,80 К/хв, питома витрата електроенергії в сучасній ДСП складає 0,44 кВт×год/(т×К). Для визначення витраченого на нагрів металу кількості хімічної енергії складено модель теплового і матеріального балансів паралельного проходження чотирьох хімічних реакцій з фактичним сумарним тепловим ефектом 947 кВт×год (табл. 2). Показано, що ця величина теплового ефекту може бути досягнута при окисненні близько 15% порошку вуглецю згідно з хімічною реакцією 1 (табл. 2) і міри допалювання СО рівною 60 %. Таким чином, зростання прибуткової частини теплового балансу високопродуктивної дугової сталеплавильної печі за рахунок збільшення витрати кисню, що подається у ванну на етапі нагріву рідкого розплаву, обмежений реакцією прямого окислення часток вуглецю. У результаті проведених досліджень встановлено, що величина приросту тепловмісту сталі за рахунок проходження реакцій 1-4 (табл. 2) від загальної кількості тепла, що генерується в робочому просторі ДСП, в кінці плавки складає близько 40%. При

збільшується прямо пропорційно до його концентрації і складає від 0,19 до 0,29 м³/(т×с).

У п'ятому розділі «Дослідження підпроцесу нагріву розплаву електричною дугою» розглянуті питання поєднання двостадійного нагріву розплаву на кінцевій стадії електроплавки і в агрегаті ківш-піч, а також ефективного поєднання параметрів перемішування інертним газом і дугового нагріву металу в сталерозливному ковші.

На підставі складання миттєвого енергетичного балансу пла-

цьому загальна питома витрата теплової енергії на нагрів сталі дорівнює $0,61 \text{ кВт} \times \text{год} / (\text{т} \times \text{К})$ і сумірна з аналогічним показником для класичної дугової електропечі.

Таблиця 2

Кількість реагентів і тепловий ефект хімічних реакцій при мірі допалювання CO, який дорівнює 60%

№ реакції	Реакція	Маса вуглецю, кг	Кількість введеного кисню, м ³	Тепловий ефект, кВт×год
1	$C_{\text{ТВ}} + \{O_2\} = \{CO_2\}$	34,31	64,04	312,55
2	$(FeO) + C_{\text{ТВ}} = [Fe] + \{CO\}$	190,69	0	-690,30
3	$[Fe] + 0,5 \{O_2\} = (FeO)$	0	177,34	622,47
4	$\{CO\} + 0,5 \{O_2\} = \{CO_2\}$	0	106,41	702,28
СУМА:		225,00	347,79	947,00

Вимір показників нагріву металу в 110-тонному сталерозливному ковші агрегату ківш-піч конструкції ЗАТ «НКМЗ» в мартенівському цеху ВАТ «Виксунський металургійний завод» показав, що при середній швидкості нагріву розплаву, яка дорівнює $4,21 \text{ К/хв}$, питома витрата електроенергії склала $0,30 \text{ кВт} \times \text{год} / (\text{т} \times \text{К})$, а доля корисної енергії, що витрачається на нагрів рідкої сталі, дорівнює 77 %.

На рис. 8 представлені результати порівняльної оцінки витрат електроенергії і часу на проведення двостадійного нагріву металу в сучасній і класичній ДСП, а також в АКП.

Робота АКП в модулі з сучасною ДСП (рис. 8а) дозволяє широко використовувати зниження температури випуску вуглецевого напівпродукту як один з енергозбережних чинників. Так, зниження температури випуску сталі з електропечі на 60°C дозволяє економити до $7,8 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{т}$ при одночасному збільшенні тривалості нагріву в АКП на 18 хв. З іншого боку, збільшення температури випуску сталі з сучасної електропечі можна розглядати як резерв підвищення продуктивності сталеливарного модуля, що, проте, супроводиться зростанням сумарної витрати електроенергії на нагрів сталі.

У разі роботи АКП з електропечю класичної конструкції (рис. 8б), наприклад, на проміжному етапі реконструкції спеціалізованого міні заводу, тривалість його роботи така ж, як і в попередньому варіанті і залежить від температури випуску плавки. У той же час, збільшення температури випуску на 60°C , яке супроводжується істотним зростанням витрати електроенергії (на $25,8 \text{ кВт} \times \text{год} / \text{т}$ сталі), не призводить до відчутного скорочення загальної тривалості нагріву.

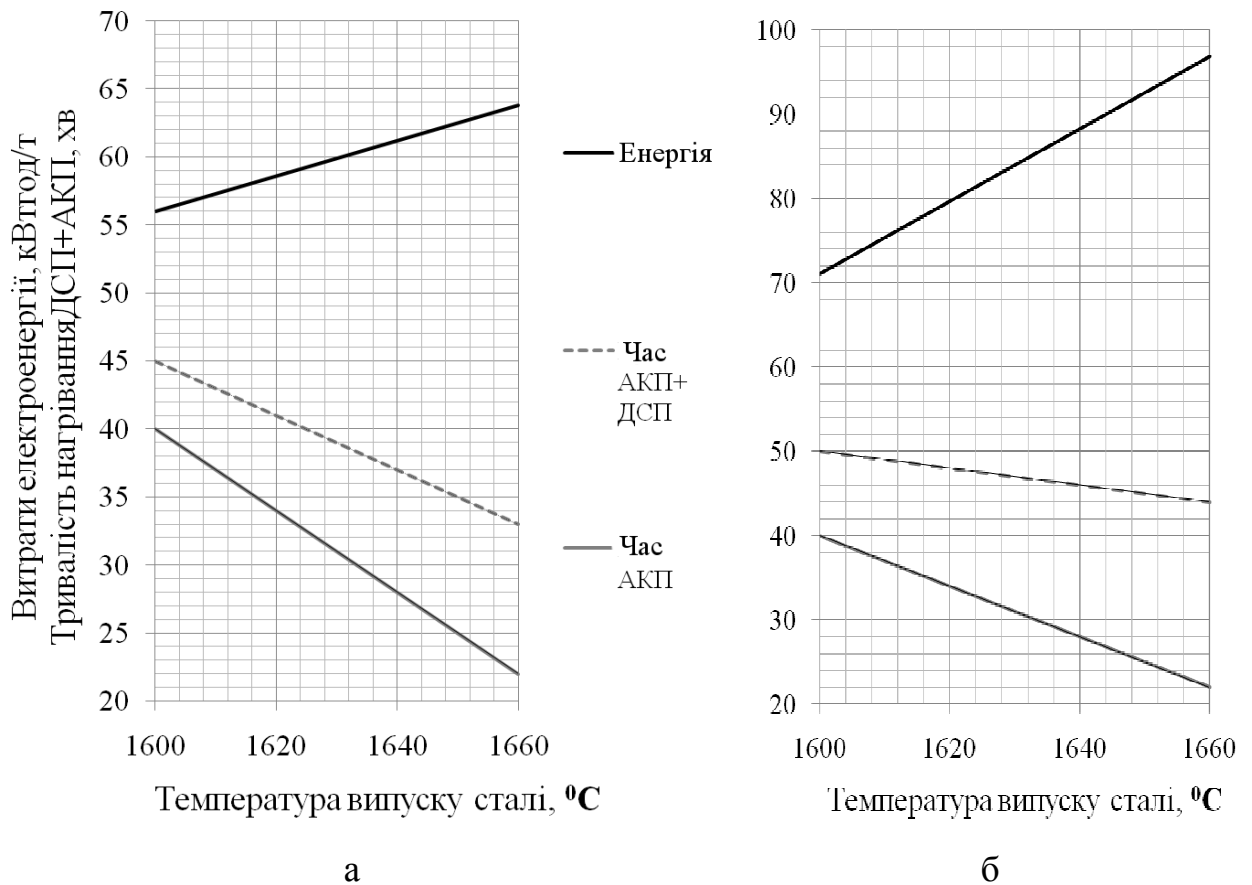


Рис. 8. Результати оцінки сумарної витрати електроенергії і тривалості нагріву рідкої сталі при зміні температури випуску металу з печі

На базі розвитку можливостей пакету прикладних програм ANSYS досліджено вплив параметрів електричної дуги, введення інертного газу і товщини шару рафінувального шлаку в сталерозливному ковші на показники нагріву металу. Виходячи з результатів, отриманих за допомогою математичного моделювання, показане наступне (рис. 9):

- зсув продувальних пробок до центру днища ковша в дослідженому діапазоні розміщення ($\rho_{пр} = 0,38 - 0,76$) призводить до збільшення швидкості нагріву металу електричною дугою в агрегаті ківш-піч у 2,5 – 3,0 рази;
- вплив величини витрати інертного газу на швидкість нагріву розплаву в сталерозливному ковші посилюється при наближенні продувального вузла до центру днища ковша, так, збільшення питомої інтенсивності продування на моделі з 0,3 до 2,0 л/(хв×т) призводить до зниження швидкості нагріву більш, ніж у три рази для $\rho_{пр} = 0,38$ і в 1,2 рази для $\rho_{пр} = 0,76$;
- незалежно від місця розташування продувальних пробок, питома інтенсивність продування сталі при нагріві електричною дугою має знаходитися в діапазоні значень від 0,5 до 1,0 л/(хв×т).

При цьому визначення мінімальних значень питомій інтенсивності продування сталі при нагріві розплаву електричною дугою в промислових умовах вимагає врахування стійкості шлакового поясу сталерозливного ковша в результаті ерозії в контакт з перегрітим рафінувальним шлаком.

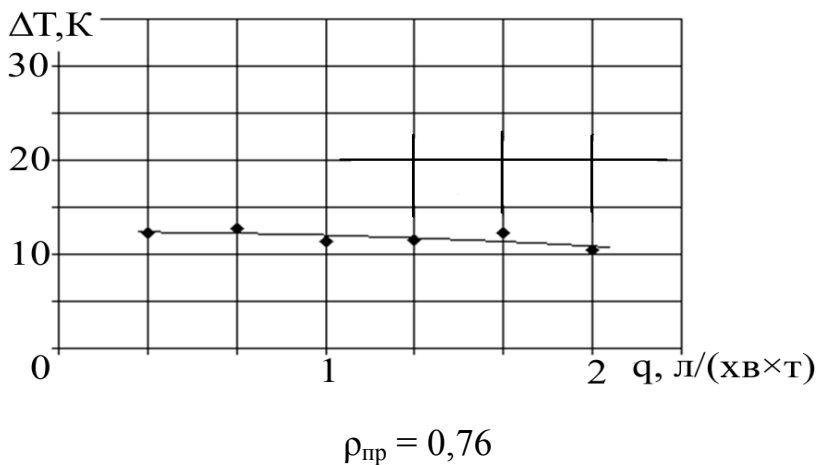
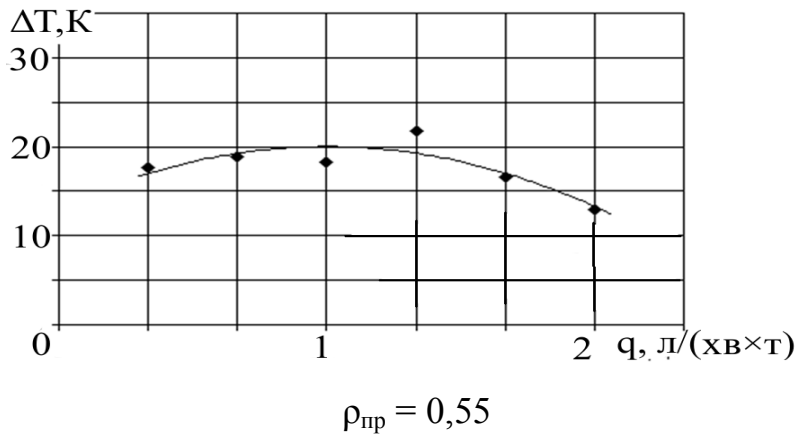
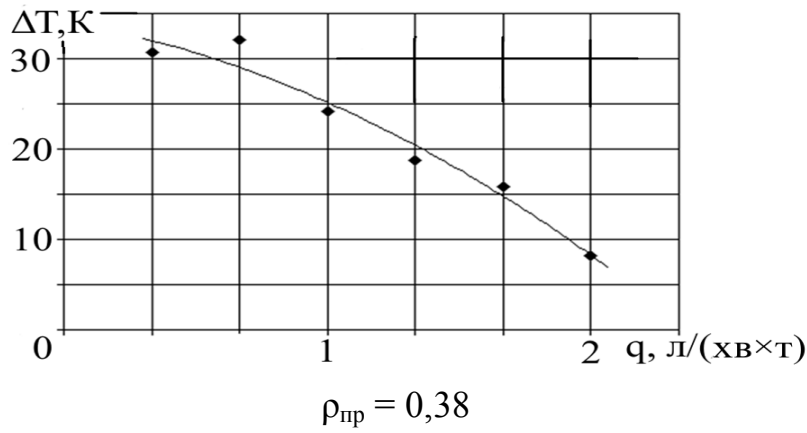


Рис. 9. Графіки приросту середньої температури розплаву за 10 хв (ΔT) залежно від витрати газу (Q) для різного розташування продувальних вузлів

впазоні товщини шару шлаку максимальна температура поверхні шлак-метал безпосередньо під лункою електричної дуги на $300 - 400^{\circ}\text{C}$ перевищує температуру глибинних шарів металу в сталерозливному ковші і знижується на 80°C при збільшенні товщини шлакового шару з 100 до 200 мм.

На рис.10 наведені тренди сили струму вторинного ланцюга пічного трансформатора залежно від висоти торця графітованого електроду над поверхнею шлакової ванни (табл. 3), які зняті при роботі агрегату ківш-піч електросталеплавильного цеху ВАТ «Енергомашспецсталь» при нагріві в сталерозливному ковші плавки масою 62 т.

Аналізуючи результати моделювання розподілу температури в шлаку і металі при нагріві розплаву електричною дугою (довжина 100 мм, глибина шлакової лунки 70 мм) встановлено, що зниження товщини шлакового покриву з 200 до 100 мм, забезпечує збільшення об'єму прогрітого металу при одночасному істотному зниженні кількості перегрітого електричною дугою шлаку, що пояснюється різницею величини теплового опору шару шлаку під лункою. При товщині шару шлаку, що дорівнює 100 мм, тепловий потік з області лунки електричної дуги має переважний вертикальний напрям зверху до низу, що сприяє ефективнішому засвоєнню тепла рідкою сталлю, а зона максимальної температури поверхні металу концентрується під лункою електричної дуги.

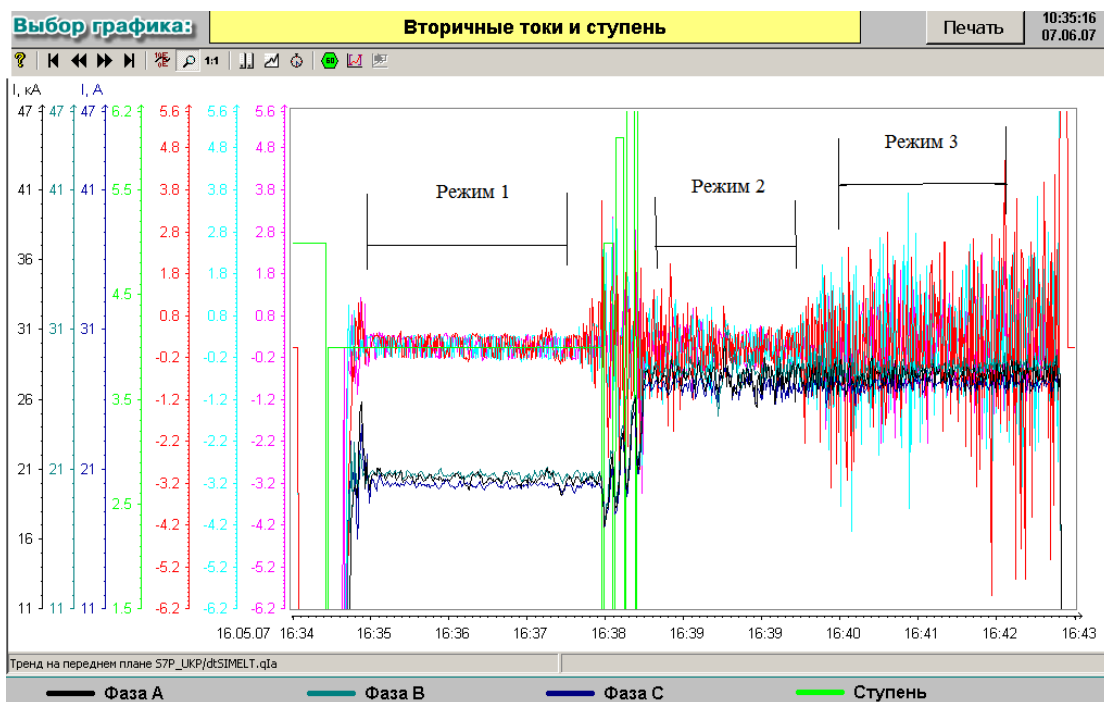


Рис. 10. Тренди сили струму в агрегаті ківш-піч електросталеплавильного цеху ВАТ «Енергомашспецсталь»

Таблиця 3

Режими проведення експерименту з нагріву сталі в АКП (до рис. 10)

Режим	Витрата аргону, л/хв	Сила струму дуги, кА	Глибина шлакової лунки, мм	Довжина дуги, мм	Відстань від торця електрода до гладі шлаку, мм
1	50	20	42	68	26
2	50	28	59	77	16
3	67	28	59	77	16

У першому режимі горіння електричної дуги стабільне, що, зокрема, забезпечується достатнім для запобігання шунтуванню електричної дуги відстанню від торця електрода до рівня шлаку (26 мм). Другий режим характеризується менш стійким горінням електричної дуги (відстань між електродом і шлаком 16 мм), що при збільшенні витрати інертного газу наводить до переходу в третій режим роботи, який відрізняється нестабільністю. Показано, що основні принципи ефективного нагріву сталі в агрегаті ківш-піч полягають в забезпеченні товщини шару шлаку під лункою електричної дуги в 20-30 мм і величини зазору між торцем електрода і поверхнею шлакової ванни близько 25 мм при витраті продувального аргону в період нагріву металу до $0,1 \text{ л}/(\text{хв} \times \text{Т})$.

У шостому розділі «Розробка основних параметрів агрегатів і технології ковшової обробки сталі для виробництва залізничних коліс в умовах ма-

ртенівського цеху ВАТ «Виксунський металургійний завод» представлено варіант організації ковшової обробки сталі в умовах спеціалізованого підприємства, комплекс виробництва залізничних коліс якого включає мартенівський і колесопрокатний цехи, і, по суті, є втіленням концепції спеціалізованого міні заводу радянського періоду розвитку чорної металургії.

До початку реконструкції до складу мартенівського цеху ВАТ «ВМЗ» входили три основні мартенівські печі місткістю 250 т (скрап-процес без вживання кисню), кожна з яких оснащена жолобом, що коливається, для випуску в два сталерозливних ковші. За прийнятою в цеху технологією, сталь в печі розкислювали кремнієм і марганцем, а остаточне розкислювання проводили при випуску феросиліцієм і комплексним сплавом СКТиА (45% Si, 15% Ca, 10% Ti, 2% Al) в кожному з двох ковшів.

Вимоги до кондицій рідкого металу в сталерозливному ковші, а також особливості й обмеження виробництва, що склалося, полягали в наступному:

- вузька для високовуглецевої сталі вилка вмісту вуглецю (до 0,03%), низький вміст водню в злитку (не більше 1,5 ppm) і загального кисню (не більше 30 ppm) в сталерозливному ковші;
- організація потокової обробки всього об'єму сталі, що виплавляється двома мартенівськими печами цеху;
- задана конструкція сталерозливного ковша і його конфігурація;
- обмеження у виборі будівельного майданчика (місце демонтованої мартенівської печі), дефіцит виробничого простору і наявність «вузьких місць».

У ході вирішення науково-технічної проблеми розроблено технологію послідовної обробки двох ковшів плавки, яка включає такі елементи: скочування шлаку, нагрів сталі, десульфуріацію рафінувальним шлаком, розкислювання, вакуумування, остаточне розкислювання та очисне продування інертним газом. Визначені робочі параметри агрегату ківш-піч: електричні характеристики пічного трансформатора, розташування продувальних пробок і витрату інертного газу для кожної технологічної операції, масу і склад рафінувального шлаку, тривалість циклу обробки і температурний режим плавки, а також камерного вакууматора: витрата і тривалість глибокого вакуумування, розмір вільного борту і маси металу в ковші, температурний режим обробки.

Порівняльна характеристика технічних параметрів агрегатів ківш-піч ВАТ «ВМЗ» конструкції ЗАТ «НКМЗ», ЗАТ «ММЗ «Істил (Україна)» (DANIELI, Італія) і ЗАТ «Донецьксталь-МЗ» (VAI-FUCHS, Австрія-Німеччина) представлена в табл. 4. При рівній потужності пічного трансформатора агрегат ківш-піч вітчизняного виробництва конструкції ЗАТ «НКМЗ» перевершує зразки металургійної техніки, що постачаються на територію України провідними виробниками устаткування для ковшової обробки, за показниками ресурсо- і енергозбереження, а саме, швидкості нагріву металу - на 27%, питомій витраті графітованих електродів - на 10% і питомій витраті електричної енергії - на 44%.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика технічних параметрів

АКП ВАТ «ВМЗ»

Параметр	ВАТ «ВМЗ»	ЗАТ «ММЗ «Істил (Україна)»	ВАТ «Донецьксталь- МЗ»
Маса металу, т	110-120	100-120	150
Потужність трансформатора, МВА	18	18+20%	18
Діаметр електрода, мм	400	405	410
Діаметр розпаду електродів, мм	700	700	650
Швидкість нагріву, К/хв	5,7	3,5	4,5
Витрата електродів, г/кВт×год	9	11	10
Витрата електроенергії, кВт×год/(т×К)	0,30	0,50	0,45
Тривалість обробки, хв			
загальна	50-60	60-90	28-45
нагрів	20-30	20-50	10-20

Після завершення першого етапу переходу мартенівського цеху ВАТ «Виксунський металургійний завод» до сучасної системи сталеплавильної технології шляхом використання агрегата ківш-піч і камерного вакууматора середня тривалість плавки в мартенівській печі скоротилася більше, ніж на 20%, при цьому сумарний брак заготовок і готових залізничних коліс по УЗК знизився на 1,02% (абс.).

У сьомому розділі «Розробка варіанту реструктуризації сталеплавильного комплексу в умовах ВАТ «Енергомашисталь» наведено результати використання наукових досліджень і методик автора під час реконструкції електросталеплавильного цеху з дуговими сталеплавильними печами ємністю 12, 50 і 2×100 т з метою організації відливання під вакуумом крупних злитків (до 360 т) і збільшенням продуктивності до 210-240 тис. т рідкої сталі в рік.

Орієнтуючись на сучасну технологічну концепцію виплавки вуглецевого напівпродукту з подальшим доведенням металу в сталерозливному ковші на першому етапі реконструкції була організована ділянка позапічної обробки, до складу якої увійшли агрегат ківш-піч і камерний вакууматор.

При розробці техніки і технології позапічної обробки в цеху, що реконструюється, разом з традиційними особливостями, була врахована необхідність наявності в цеху двох типорозмірів сталерозливних ковшів: 130-тонних, призначених для прийому двох плавок і відливання крупних злитків і 75-тонних для прийому однієї плавки і відливання дрібних і середніх злитків.

З метою забезпечення заданої продуктивності і вимог до хімічного складу металу була розроблена поєднана з робочими параметрами агрегатів технологія ковшової обробки:

- хімічний склад і маса рафінувального шлаку з величиною напруги і сили струму електричної дуги;
- потужність пічного трансформатора з температурним режимом і тривалістю циклу ковшової обробки;
- розташування продувальних пробок і оптимізації витрати інертного газу з узгодженням швидкостей нагріву і десульфурації для отримання заданого кінцевого стану розплаву;
- тривалість вакуумування з величиною вільного борту сталерозливного ковша.

Технічні параметри і деякі досягнуті показники агрегатів ковшової обробки представлені в табл. 5 і 6.

Випробування показали, що розроблений для умов виробництва сталі в електросталеплавильному цеху ВАТ «Енергомашпецсталь» агрегати конструкції ЗАТ «НКМЗ» за показниками ресурсо- і енергозбереження, а саме, питомою витратою електричної енергії, яка склала 0,28 кВт×год/(т×К), і питомою витратою графітованих електродів, яка не перевищує 9 г/кВт×год, також перевершує зразки металургійної техніки, що постачаються на територію України (табл. 4, 5 і 6).

Таблиця 5

Технічні характеристики агрегату ківш-піч ВАТ «Енергомашпецсталь»

Параметр	Значення
Маса металу, т	100/60
Потужність пічного трансформатора, МВА	18
Діаметр електродів, мм	400
Діаметр розпаду електродів, мм	700
Максимальна швидкість нагріву, К/хв	5,7
Витрата електродів, г/кВт×год	9
Витрата електроенергії, кВт×год/(т×К)	0,28
Тривалість обробки, хв.	
загальна	50-60
нагрів	20-30

Таблиця 6

Основні технічні параметри камерних вакууматорів конструкції ЗАТ «НКМЗ»

Параметр	ВАТ «ЕМСС»	ВАТ «ВМЗ»

Маса металу, т	100/60	110
Тип процесу	VD/VOD	VD
Тип насоса	Механічний	Пароежекторний
Мінімальний тиск, кПа	0,67	0,67
Продуктивність насосів по сухому повітрю, кг/ч	300	300
Витрата пари, т/год	-	до 10,5
Швидкість набору вакууму, хв	5-8	3-5
Вміст азоту, ppm	< 60	< 35
Вміст водню, ppm	< 1,5	< 1,5

Тривалість вакуумної обробки сталі при мінімальному тиску розрахована із застосуванням відомих методик і незалежно від оснащення вакууматорів механічними (ВАТ «ЕМСС»), чи пароежекторними насосами (ВАТ «ВМЗ») дозволила гарантувати вміст водню в рідкій сталі менше 1,5 ppm.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну проблему вдосконалення технології рафінування і нагріву металу під час ковшової обробки в межах сучасного сталеливарного модуля спеціалізованого металургійного міні заводу шляхом раціонального поєднання робочих параметрів агрегатів і комплексної дії фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних підпроцесів енерго- і ресурсозберігаючої технології. Нові теоретичні уявлення про процеси вторинного окислення, десульфуріацію металу, взаємодії електричної дуги з поверхнею рафінувального шлаку при перемішуванні розплаву інертним газом, поведінки малозалізного шлаку в сталерозливному ковші при вакуумній обробці забезпечили створення сучасних зразків вітчизняного устаткування в комплексі з технологією ковшової обробки сталі.

1. Аналіз сучасного стану системи технологій виплавки сталі засвідчив, що на міні заводах, стратегія яких повністю або частково спрямована на спеціалізацію виробництва, концепція ковшової обробки полягає в розширенні можливостей технологічних агрегатів за рахунок ефективного узгодження і перерозподілу технологічних операцій, як в межах агрегату, так і між ними. У ході аналізу сучасних методик і результатів досліджень встановлено, що для організації проектування вітчизняних зразків техніки в комплексі з технологією позапічної обробки сталі для багатофункціональних технологічних модулів спеціалізованих металургійних міні заводів низка процесів рафінування і нагріву металу вивчені недостатньо повно і потребує проведення додаткових досліджень. А саме, виконання методологічного обґрунтування принципів поєднання робочих параметрів агрегатів і величини зовнішньої дії на етапі ковшової обробки сталі, розробки ряду методик фізичного моделювання продування розплаву в сталерозливному ковші інертним газом, вивчення процесу формування крапель металу при розриві газових міхурів на поверхні ванни, математичного моделювання впливу інтенсивно-

сті продування інертним газом, товщини рафінувального шлаку і розміщення продувальних елементів на зміну середньої температури рідкої сталі при нагріві електричною дугою.

2. Із застосуванням методів фізичного моделювання продування розплаву в сталерозливному ковші інертним газом через два продувальні вузли встановлений вплив на тривалість усереднювання витрати газу, розташування продувальних вузлів, відношення висоти металу в ковші до його діаметра. Встановлено, що величина висоти наливання сталі (співвідношення H/D) і витрата газу Q найістотніше впливають на час перемішування. При цьому майже у два рази менший вплив на тривалість усереднювання має величина кута між продувальними вузлами α . Найменш істотна тривалість усереднювання залежить від положення продувальних вузлів $\rho_{\text{пр}} = r_{\text{пр}}/R_{\text{ков}}$.

3. На основі фізичного моделювання продування розплаву в сталерозливному ковші інертним газом через один і два продувальні вузли встановлено вплив витрати інертного газу, кількості і розташування продувальних вузлів на поведінку шлакової ванни різної товщини. Показано, що при малій товщині шару «шлаку» у разі продування через одну пробку площа оголення «металу» мінімальна у всьому діапазоні зміни витрати продувального газу. Так, площа оголення для режиму продування однією пробкою менша, ніж двома на 30-35% при малій (0,1 л/хв) і на 5-10% при високій (0,6 л/хв) витраті газу. У той же час, при товстому шарі «шлаку» вживання двох продувальних пробок дозволяє уникнути оголення «металу». Збільшення витрати продувального газу до 0,6 л/хв призводить до того, що площі зон оголення для режиму продування однією пробкою і двома (60°) стають рівними, а в результаті вживання двох віддалених одна від одній пробок (135°) площа оголення збільшується на 30%. Таким чином, ефективне досягнення тієї або іншої технологічної мети можливе при роздільному управлінні витратою інертного газу через кожну з двох продувальних пробок індивідуально.

4. Математичне моделювання за допомогою сучасних прикладних пакетів програм з гідродинамічними розрахунковими модулями дозволило оцінити вплив інтенсивності продування інертним газом і розміщення продувальних елементів на зміну середньої температури розплаву при нагріві електричною дугою. Вперше встановлено, що розташування продувальних пробок разом з відомими фактами впливу на тривалість усереднювання розплаву і інтенсивність масообмінних процесів між шлаком і металом визначає величину швидкості нагріву металу. Причому, при розташуванні продувальних вузлів у дослідженому діапазоні ($\rho_{\text{пр}} = 0,38 - 0,76$), встановлений вплив місця їх розташування на характер зміни середньої температури металу від інтенсивності продування. Зсув продувальної пробки до центру днища сталерозливного ковша посилює вплив величини витрати інертного газу на швидкість нагріву розплаву, при цьому збільшення питомої інтенсивності продування на моделі з 0,3 до 2,0 л/(хв \times т) призводить до зниження швидкості нагріву більше, ніж у три рази для $\rho_{\text{пр}} = 0,38$ і в 1,2 рази для $\rho_{\text{пр}} = 0,76$. Показано, що незалежно від місця розташування продувальних пробок, питома інтенсивність продування при нагріві електричною дугою рідкого ме-

талу в сталерозливному ковші має знаходитися в діапазоні значень від 0,5 до 1,0 л/(хв×т).

5. На підставі досліджень за допомогою математичного моделювання і промислового експерименту встановлено вплив товщини шлакового шару на ефективність нагріву сталі в агрегаті ківш-піч. Показано, що зменшення товщини шлакового покриття в сталерозливному ковші сприяє ефективнішому засвоєнню тепла рідкою сталлю і забезпечує збільшення об'єму прогрітого металу при одночасному зниженні кількості перегрітого електричною дугою шлаку. Сформульовано основні принципи ефективного нагріву сталі електричною дугою, які полягають в забезпеченні товщини шлаку під лункою електричної дуги в межах від 20 до 30 мм і розмір зазору між торцем електроду і поверхнею шлакової ванни близько 25 мм.

6. Експериментально встановлено механізм перенесення кисню через шар рафінувального шлаку під час перемішування розплаву в сталерозливному ковші з високою інтенсивністю продування інертним газом. Показано, що перенесення кисню на межу шлак-метал здійснюється струменевими краплями сталі, які утворюються в результаті розриву газових міхурів на поверхні розплаву, окислюються в робочому просторі агрегату і після витання в шлаку потрапляють під дією сил гравітації на міжфазну межу. На основі запропонованого механізму взаємодії металу і шлаку вперше сформульовано принцип наявності критичної з точки зору ефективної десульфурації величини інтенсивності продування, яке виражається наступною залежністю $q = 5,69 \times m^{-0,18} \times \delta$ (тут m – маса металу в сталерозливному ковші, т; δ – товщина шару шлаку, м).

7. Порівняльна оцінка витрат електроенергії і часу двостадійного нагріву металу показала, що робота АКП в модулі із сучасною високопродуктивною ДСП дозволяє широко застосовувати технологічний прийом зниження температури випуску вуглецевого напівпродукту як енергозберіжливий чинник. Так, зниження температури випуску сталі з електропечі на 60 К дозволяє економити до 7,8 кВт×год/т при паралельному збільшенні тривалості нагріву в АКП на 18 хв Крім того, в модулі «сучасна ДСП - АКП» можлива реалізація стратегії досягнення максимальної продуктивності при збільшенні температури випуску сталі, що, у свою чергу, проте, призводить до підвищення витрати електричної і хімічної енергії в ДСП. При роботі АКП із класичною ДСП можлива реалізація лише однієї стратегії – скорочення загальної витрати електроенергії за рахунок зниження температури випуску сталі до оптимальних значень.

8. Вивчено особливості процесу спінювання рафінувального шлаку в сталерозливному ковші при наборі вакууму, що вперше дозволило за допомогою розробленої моделі проводити кількісну оцінку товщини шлакової піни, яка утворюється в сталерозливному ковші і величини його вільного борту, товщини шлакового шару, а також порівнювати величину основності шлаку для мінімізації тривалості набору вакууму. Кількісна оцінка показує, що на товщину шлакової піни в період набору вакууму істотним чином впливає основність рафінувального шлаку і його кількість (товщина шару

шлаку). Причому, із збільшенням основності з 2,5 до 4,0 товщина шлакової піни росте приблизно в 1,5 рази.

9. Розроблений автором комплекс критеріїв проектування технології і робочих параметрів агрегатів ковшової обробки сталі застосовується ВАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» під час розробки нових сталеплавильних агрегатів і дозволив вперше в Україні створити вискоєфективне металургійне устаткування, що забезпечує світовий рівень металургійних гарантій. Наукові дослідження, технологічні прийоми і методики були покладені в основу низки розроблених пакетів «технологія ковшової обробки - агрегати доведення сталі» для техніко-комерційних пропозицій, які за результатами тендерних торгів були реалізовані. Промислові розробки автора знайшли застосування при проектуванні, гарантійних випробуваннях, введенні в експлуатацію і подальшій роботі в режимі потокового виробництва агрегатів і технології ковшової обробки сталі.

10. Сумарний підтверджений економічний ефект, отриманий ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод», в результаті реалізації проектів щодо створення і введення в експлуатацію агрегатів ківш-піч і вакууматор спільно з технологією позапічної обробки сталі для виробництва залізничних коліс в мартенівському цеху ВАТ «Виксунський металургійний завод» (м. Вика, Нижньогородська обл., Російська Федерація, 2004 р.) і сталі для виробництва крупних злитків в електросталеплавильному цеху ВАТ «Енергомаш-спецсталь» (м. Краматорськ, Україна, 2008 р.) склав 20405514 грн. (у перерахунку за офіційним курсом НБУ на 11.11.2009 р.). Частка автора - 2448662 грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Металлургические мини-заводы : монография / Смирнов А. Н., Сафонов В. М., Дорохова Л. В., Цупрун А. Ю. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 469 с.

2. Крупный слиток : монография / Смирнов А. Н., Макуров С. Л., Сафонов В. М., Цупрун А. Ю. – Донецк: Вебер, 2009. – 278 с.

3. Сафонов В. М. Оцінка параметрів спінювання рафінуючого шлаку в сталерозливному ковші / В. М. Сафонов, О. М. Смірнов, К. Є. Пісмарьов // Металознавство та обробка металів. – 2008. – №1. – С. 55-59.

4. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 1 / А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш, В. М. Сафонов, К. Е. Писмарев // Процессы литья. – 2008. – №4. – С. 41-48.

5. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 2 / А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш, В. М. Сафонов, К. Е. Писмарев // Процессы литья. – 2008. – №5. – С. 30-35.

6. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 3 / А. Н. Смирнов, В. М.

- Сафонов, Е. В. Ошовская, С. Жемеров, К. Е. Писмарев // Процессы литья. – 2009 – №5. – С. 11-19.
7. Сафонов В. М. Современный уровень и будущее электросталеплавильного производства: 9-я Европейская конференция по электрометаллургии в Кракове / В. М. Сафонов, А. Н. Смирнов // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – №5. – С. 150-155.
8. Основные технические и технологические решения реконструкции мартеновского цеха ОАО «Выксунский металлургический завод» / В. М. Сафонов, А. Н. Смирнов, А. А. Тимофеев, В. И. Зема, В. Н. Тиунов, С. В. Матвейков // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – №8. – С. 83-86.
9. Смирнов А. Н. Пуск новых и реконструкция действующих сталеплавильных цехов: концептуальные подходы и новые решения / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, К. З. Питюл // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – №8. – С. 27-33.
10. Сафонов В. М. Некоторые направления развития и построения высокоэффективных мини-заводов и модулей / В. М. Сафонов // Metall и литье Украины. – 2006. – №1. – С. 76-79.
11. Тиунов В. Н. Современное оборудование АО «НКМЗ» для внепечной обработки и непрерывной разливки стали / В. Н. Тиунов, С. В. Матвейков, В. М. Сафонов // Metall и литье Украины. – 2006. – №1. – С. 40-43.
12. Сафонов В. М. Опыт освоения и эксплуатации водоохлаждаемых элементов дуговой сталеплавильной печи / В. М. Сафонов // Metall и литье Украины. – 2000. – №9-10. – С. 3-6.
13. Основные задачи подготовки кислородно-конвертерного цеха ОАО «ЕМЗ» к работе в составе литейно-прокатного комплекса / В. С. Сапиро, Ю. В. Оробцев, Ю. В. Коновалов, В. М. Сафонов, Ю. А. Пашковский, Е. Н. Дымченко // Metall и литье Украины. – 1996. – №6. – С. 19-22.
14. Сафонов В. М. Современный уровень и будущее электросталеплавильного производства / В. М. Сафонов, А. Н. Смирнов // Сталь. – 2009. – №1. – С. 47-51.
15. Сафонов В. М. Особенности нагрева стали в дуговой сталеплавильной печи и агрегате ковш-печь / В. М. Сафонов, А. Н. Смирнов // Сталь. – 2008. – №6. – С. 37-40.
16. Смирнов А. Н. Metallургические мини-заводы: прошлое, настоящее и будущее / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов // Сталь. – 2007. – №1. – С. 37-41.
17. Вариант реконструкции мартеновского цеха специализированного metallургического завода / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, А. Ю. Цупрун, В. Н. Тиунов, В. И. Зема, В. А. Тимофеев, И. Н. Салмаш // Сталь. – 2006. – №8. – С. 8-9.
18. Смирнов А. Н. Электроmetallургический комплекс Украины – особенности развития / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, В. В. Лесовой // Сталь. – 2006. – №11. – С. 70-73.

19. К вопросу о десульфурации стали в агрегате ковш-печь и камерном вакууматоре / В. М. Сафонов, А. Н. Смирнов, К. Е. Писмарев, Д. В. Проскуренко // *Электromеталлургия*. – 2009. – №11. – С. 14-18.

20. О влиянии некоторых технических и технологических параметров на эффективность обработки стали в ковше / В. М. Сафонов, А. Н. Смирнов, А. Ю. Цупрун, Е. В. Ошовская // *Электromеталлургия*. – 2009. – №8. – С. 2-6.

21. Исследование характера распределения частиц металла в шлаке при продувке расплава аргоном в ковше / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, Д. В. Проскуренко, К. Е. Писмарев // *Электromеталлургия*. – 2009. – №7. – С. 17-22.

22. Разработка техники и технологии внепечной обработки в ЭСПЦ Краматорского машиностроительного завода «Энергомашспецсталь» / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, А. Г. Ковалев, С. Ю. Волков, В. Н. Тиунов, С. В. Матвейков // *Электromеталлургия*. – 2007. – №6. – С. 17-19.

23. Сафонов В.М. Современная электродуговая печь: основные параметры и концептуальные решения / В. М. Сафонов, А. Н. Смирнов // *Электromеталлургия*. – 2005. – №6. – С. 2-13.

24. Сафонов В. М. Технологические аспекты внепечной обработки стали в ЭСПЦ Краматорского машиностроительного завода «ЭНЕРГОМАШ-СПЕЦСТАЛЬ» / В. М. Сафонов, А. Г. Ковалев, С. Ю. Волков // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Металургія*. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 9 (122). – С.59-70.

25. Сафонов В. М. Технические и технологические решения реконструкции мартеновского цеха специализированного металлургического завода / В. М. Сафонов, А. Ю. Цупрун, В. Н. Тиунов // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Металургія*. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 102. – С.37-41.

26. А. с. 1632983 СССР, МКИ³ С 21 С 5/48. Способ изготовления накопника фурмы для обработки металла инертным газом / С. Н. Тимошенко, В. В. Приходько, В. М. Сафонов, В. С. Сапиро, А. А. Ларионов, П. Г. Оноприенко, А. В. Побегайло, Г. Ф. Кузнецов (СССР) – №4672797/02 ; заяв. 04.04.89; опубл. 07.03.91, Бюл.№9.

27. А. с. 1252356. СССР, МКИ³ С 21 С 7/10 Способ футеровки патрубка вакууматора и шаблон для его осуществления / В. С. Сапиро, В. В. Приходько, В. М. Сафонов, С. Н. Тимошенко, М. М. Перистый А. А. Лавриненко (СССР) – №3800913/22-02 ; заяв. 12.10.84 ; опубл. 23.08.86, Бюл.№ 31.

28. Пат. 40737 UA, МПК С 21 С 5/00. Пристрій для відбору проби розплаву з металургійної ємності / Сафонов В. М., Смірнов О. М., Проскуренко Д. В., Пісмарьов К. Є., Колесников Д. В.; заявник та патентовласник Донец. нац. техн. ун-т. – № 2008 12993 ; заявл. 10. 11. 08 ; опубл. 27.04.09, Бюл. № 8.

29. Upgrading of EAF shop at Kramatorsk Engineering Plant Energomashspecstal (Ukraine) / A. Smirnov, V. Safonov, A. Tsuprun, V. Kovalev, V. Tiunov // 9th European Electric Steelmaking Conference: Archives of metallurgy and materials (Krakow, 19-23 May 2008). – Poland – Warszawa: Warszawska Drukarnia Naukowa PAN, 2008. – Vol. 53. – № 2. – P. 483-488.

30. Технологические аспекты реконструкции ЭСПЦ машиностроительного завода «Энергомашспецсталь» / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, А. Г. Ковалев, С. Ю. Волков, В. Н. Тиунов, С. В. Матвейков // Труды девятого конгресса сталеплавателей (Старый Оскол, 17-19 октября 2006г.). – М: ОАО «Черметинформация», 2007. – С. 338-341.

Особистий внесок автора в роботах, що опубліковані у співавторстві: у монографіях [1, 2] – результати аналізу стану сучасної системи технологій виплавки і ковшової обробки сталі, класифікація агрегатів і обґрунтування підходу до їх вибору, оцінки робочих параметрів, а також результати вивчення варіантів переходу до організації сучасного виробництва при реконструкції підприємств, що діють, і будівництві нових; [3] – результати досліджень залежності об'єму шлакової піни, що утворюється при вакуумуванні сталі в ковші, від основності малозалізного шлаку, постановка і проведення промислового експерименту, розробка фізико-хімічної моделі процесу спінювання рафінувального шлаку при наборі вакууму; [4, 5] – теоретичний аналіз впливу розташування продувальних вузлів на час повного перемішування розплаву інертним газом в сталерозливному ковші; [6] – постановка методики експерименту, закономірності поведінки шлаку в сталерозливному ковші під час перемішування інертним газом; [7, 13, 16, 23] – аналіз стану сучасної системи технологій виплавки вуглецевого напівпродукту, класифікація агрегатів і обґрунтування підходу до вибору і оцінки робочих параметрів; [8, 17, 27] – розробка робочих параметрів агрегатів і технології ковшової обробки сталі для виробництва залізничних коліс; [9, 10, 14, 18] – результати аналізу стану сучасної металургії і прогноз перспективних напрямків її розвитку; [11, 26, 27, 28] – розробка напрямків оптимізації зовнішньої технологічної дії шляхом зміни робочих параметрів агрегатів на етапі поєданого проектування технології і устаткування ковшової металургії; [12, 15] – постановка експериментів, результати порівняльних досліджень нагріву сталі в ДСП і АКП; [19] – результати досліджень відхилення фактичного коефіцієнта розподілу сірки між шлаком і металом від рівноважного при високій інтенсивності продування аргоном в агрегаті ківш-піч, постановка промислових експериментів, аналіз ефективності десульфурації сталі в ковші при атмосферному тиску і під вакуумом; [20] – аналіз впливу розташування продувальних вузлів у днищі сталерозливного ковша на характер зміни середньої температури металу, постановка промислових експериментів; [21] – постановка промислового експерименту, результати вивчення процесів прямого і зворотного емульгування при продуванні розплаву аргоном у ковші; [22, 24, 30] – розробка робочих параметрів агрегатів і технології ковшової обробки сталі для виробництва крупного злитка; [29] – розробка методології поєданого проектування технології і робочих параметрів агрегатів ковшової металургії.

АНОТАЦІЯ

Сафонов В.М. Розвиток теорії і технології ковшової обробки в сталеливарному модулі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 - «Металургія чорних та кольорових металів і спеціальних сплавів» - Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2010.

Наведено рішення важливої науково-технічної проблеми організації ковшової обробки сталі в межах сучасного сталеливарного модуля спеціалізованого металургійного міні-заводу шляхом поєднання робочих параметрів агрегатів і комплексної дії фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних підпроцесів.

Вперше встановлено, що висока інтенсивність продування металу інертним газом призводить до перенесення кисню на межу шлак-метал струменевими краплями сталі, що утворюються в результаті розриву газових міхурів. Із застосуванням розроблених методів фізичного, математичного моделювання та промислового експерименту показано вплив на тривалість усереднювання та зміну температури розплаву витрати газу і розташування продувальних вузлів. Встановлені особливості процесу спінювання рафінуючого шлаку в сталерозливному ковші при наборі вакууму.

Промислові розробки автора знайшли використання при проектуванні, випробуваннях, введенні в експлуатацію і подальшій роботі агрегатів і технології ковшового доведення сталі.

Ключові слова: сталеливарний модуль, ковшова обробка сталі, агрегат ковш-піч, камерний вакууматор, фізичне і математичне моделювання, робочі параметри агрегатів, перемішування, нагрів, рафінування сталі.

АННОТАЦІЯ

Сафонов В.М. Развитие теории и технологии ковшовой обработки в сталелитейном модуле. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных и цветных металлов и специальных сплавов» - Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2010.

Решена важная научно-техническая проблема совершенствования технологии рафинирования и нагрева металла в ходе ковшовой обработки в рамках современного сталелитейного модуля специализированного мини-металлургического завода путем рационального сочетания рабочих параметров агрегатов и комплексного воздействия физико-химических, гидродинамических и теплофизических подпроцессов совмещенной энерго- и ресурсосберегающей технологии. Новые теоретические представления о процессах вторичного окисления, десульфурации металла, взаимодействия электрической дуги с поверхностью рафинировочного шлака при перемешивании расплава инертным газом, поведения маложелезистого шлака в сталеразливочном ковше при вакуумной обработке обеспечили создание современных образцов отечественного оборудования в комплексе с технологией ковшовой обработки стали.

Выполнено методологическое обоснование принципов совмещения параметров внешнего технологического воздействия и гармонизации технических параметров агрегатов на этапе ковшовой обработки стали, которое основано на методике количественного сравнения равнокачественных альтернативных вариантов.

С применением методов физического моделирования продувки расплава в сталеразливочном ковше инертным газом через два продувочных узла установлено влияние на продолжительность усреднения расхода газа, расположения продувочных узлов, отношения высоты металла в ковше к его диаметру. На базе развития возможностей математического моделирования с помощью стандартного пакета прикладных программ с гидродинамическими расчетными модулями ANSYS проведена оценка влияния интенсивности продувки инертным газом и размещения продувочных элементов на изменение температуры расплава.

Впервые показано, что смещение продувочной пробки к центру днища сталеразливочного ковша усиливается влияние величины расхода инертного газа на скорость нагрева расплава. Для условий нагрева металла в агрегате ковш-печь установлено, что независимо от места расположения продувочных пробок, удельная интенсивность продувки стали при нагреве электрической дугой должна находиться в диапазоне минимальных значений (от 0,5 до 1,0 л/мин \times т). Основные принципы эффективного нагрева стали электрической дугой в агрегате ковш-печь заключаются в обеспечении толщины шлака под лункой электрической дуги в пределах от 20 до 30 мм и размером зазора между торцом электрода и поверхностью шлаковой ванны около 25 мм.

Впервые экспериментально установлен механизм переноса кислорода через слой рафинировочного шлака в ходе перемешивания расплава с высокой интенсивностью продувки инертным газом в сталеразливочном ковше. Перенос кислорода на границу шлак-металл осуществляется струйными каплями стали, которые образуются в результате разрыва газовых пузырей на поверхности расплава, окисляются в рабочем пространстве агрегата и после витания в шлаке попадают под действием сил гравитации на межфазную границу. На основе предложенного механизма взаимодействия металла и шлака впервые сформулирован принцип наличия критической с точки зрения эффективной десульфурации величины интенсивности продувки.

Сравнительная оценка затрат электроэнергии и продолжительности двухстадийного нагрева металла показала, что работа АКП в модуле с современной высокопроизводительной ДСП позволяет широко применять технологический прием снижения температуры выпуска углеродистого полупродукта как энергосберегающий фактор. Кроме того, в модуле «современная ДСП - АКП» возможна реализация стратегии достижения максимальной производительности при увеличении температуры выпуска стали, что, в свою очередь, однако, приводит к повышению расхода электрической и химической энергии в ДСП.

Изучены особенности процесса вспенивания рафинировочного шлака в сталеразливочном ковше при наборе вакуума. Установлено, что при достижении давления в вакуумкамере 20 - 10 кПа интенсивность вспенивания

шлака, главным образом, определяется содержанием в нем водорода. При этом удельная скорость выделения газа из шлака с исходным содержанием водорода 28 - 42 ppm увеличивается прямо пропорционально его концентрации и составляет $0,19 - 0,29 \text{ м}^3/(\text{т} \times \text{с})$. С помощью разработанной модели проведена количественная оценка толщины шлаковой пены, образующейся в сталеразливочном ковше, и определена величина свободного борта сталеразливочного ковша, толщина шлакового слоя, а также соизмерена величина основности шлака для минимизации продолжительности набора вакуума и продолжительности вакуумирования в целом.

Промышленные разработки автора нашли применение при проектировании, испытаниях, вводе в эксплуатацию и последующей работы в режиме поточного производства техники (агрегат ковш-печь, камерный вакууматор) и технологии ковшовой доводки стали на ОАО «Выксунский металлургический завод» (г. Выкса Нижегородской обл., Россия) и ОАО «Энергомаш-спецсталь» (г. Краматорск, Украина).

Ключевые слова: сталелитейный модуль, ковшовая обработка стали, агрегат ковш-печь, камерный вакууматор, физическое и математическое моделирование, рабочие параметры агрегатов, перемешивание, нагрев, рафинирование стали.

ABSTRACT

Safonov V. The theory and technology in the steel ladle processing module. - Manuscript.

The Doctor of sciences thesis by specialty 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and color metals and special alloys" - The State higher education institution "Donetsk National Technical University", Donetsk, 2010.

An important scientific and technical problem of organizing metal bucket in the building of a modern steel module specialized mini steel plant by optimizing the combination of operating parameters of components.

Author completed methodological study of the principles of combining the technological parameters of the external exposure and the harmonization of technical equipment parameters.

Mathematical modeling with the help of modern software package with the hydrodynamic calculation modules of ANSYS. Helped to evaluate the influence of the intensity of argon injection purge and placement of elements to the temperature deviation.

For the first time experimentally the mechanism for the transport of oxygen through the layer of slag during the refining of the melt mixing with a high intensity of blowing an inert gas in the steel ladles. Transfer of oxygen on the border of slag-metal jet beads made of steel, which are formed by the explosion of gas bubbles at the melt surface, oxidation in the working space of the unit and after the fall under the influence of gravitational forces at the interface.

Author developed the engineering that used in the design, guarantee tests, commissioning and subsequent work in the mode line production equipment and technology ladle refining of steel.

Key words: steel unit, ladle steel processing, ladle furnace, chamber degasser, physical and mathematical modeling, mixing, heating, refining steel.