

ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ШЕВЧЕНКО Анатолій Пилипович

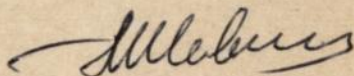
УДК 669.162.267.642.083.133.

РОЗРОБКА І РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ
ПРОЦЕСІВ ПОЗАПІЧНОЇ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ В
КОВШАХ ВДУВАННЯМ ДИСПЕРГОВАНИХ
РЕАГЕНТІВ

05.16.02 - Металургія чорних металів

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук



Дніпропетровськ - 1997

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті чорної металургії НАН України ім. З.І.Некрасова та на металургійних підприємствах України і СНД.

Офіційні опоненти:

Академік Академії наук Вищої школи,
член-кореспондент Інженерної Академії України,
Лауреат премії Ради Міністрів СРСР,
Лауреат премії Ярослава Мудрого, доктор технічних наук,
професор, завідуючий кафедрою металургії сталі
Державної металургійної академії України

Бойченко Б.М.

Доктор технічних наук, професор,
завідуючий кафедрою металургії чавуну
Дніпродзержинського державного технічного
університету

Чернятевич А.Г.

Доктор технічних наук, професор,
завідуючий кафедрою металургії сталі
Приазовського державного технічного
університету

Харлашин П.С.

Провідна установа - Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, м.Київ.

Захист відбудеться "9" листопада 1997 р. на засіданні Спеціалізованої Ради (шифр Д 03.11.02 "Металургія чорних металів") з захисту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук при Державній Металургійній академії України (320635, Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту

Автореферат розісланий "9" листопада 1997 р.

Вчений секретар Спеціалізованої Ради,
доктор технічних наук, професор

В.К.Цапко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00728750 (Т)

Цапко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Основними тенденціями розвитку й найважливішими задачами металургії в останні роки та на перспективу є забезпечення економічно доцільного виробництва широкого сортаменту конкурентоздатних і високоякісних марок сталі, зниження енергетичних та матеріальних витрат виробництва й споживання металу, підвищення гнучкості й надійності сталеплавильної переробки, а також поліпшення екології. Однією з важливіших проблем у рішенні цих задач є створення найбільш економічного, надійного й оптимального процесу позапічної десульфурації чавуну - основної шихтової складової частини сталеплавильного виробництва.

У світовій практиці однозначно вирішене питання про необхідність позапічної десульфурації чавуну. Існує значна кількість наукових і технічних наробок, а також промисловий досвід засвоєння цього процесу за різними технологічними рішеннями. З 70-х років у число провідних розроблювачів процесів позапічної десульфурації входять також учені та металурги України. Створювані процеси базувалися на наукових розробках Кулікова І.С., Воловика Г.А., Красавцева М.І., Воронової Н.О., Борнацького І.І., Найдека В.Л., Мачикіна В.І., Пліскановського С.Т., Лаврентьєва М.Л., Кудріна В.А., Гловацького А.Б., Половченка І.Г., Зборщика О.М., Смірнова М.О., Дворянінова В.О. й інш. Завдяки цьому на ряді металургійних комбінатів створюються установки (УДЧ) та відділення (ВДЧ) десульфурації чавуну.

Інжекційне введення реагентів вглиб розплаву створює сприятливі умови для забезпечення керованого тепло- і масообмінного процесу у оброблюваній ванні, в т.ч. за рахунок розвиненої реакційної поверхні реагентів, регульованого підводу учасників обмінних процесів в реакційну зону, відводу продуктів реакцій та ряду інших факторів. Це дозволяє використовувати широке коло реагентів і вар'ювати глибину десульфурації чавуну.

В той же час ступінь засвоєння реагентів і, відповідно, показники реально використовуваних технологій знаходяться на недостатньому рівні й змінюються в дуже широких межах. Основною причиною цього є недостатньо глибока й неповна наукова проробка питань, які відносяться до трактовки механізму та кінетики процесів, а також некомплексний підхід до рішень задач і вибору конкретних технологічних рішень. Не взято до уваги ряд особливостей обмінних процесів у системі "метал-реагент-шлак-газова атмосфера" під час позапічної обробки чавуну. При розгляді механізму й кінетики опущено те, що позапічна десульфурація - це не тільки введення реагентів у метал й протікання реакцій між сіркою і реагентами, а надто складний і тонкий кооперативний процес, який потребує дотримання комплексу умов для створення найбільш вигідних параметрів реалізації саме оптимального механізму процесу. Тому технології позапічної десульфурації ча-

вуну, що використовувались, здійснювали, як правило, в умовах і режимах, які відрізнялись від оптимальних.

Рішення всього кола задач є актуальною науковою проблемою, яка має важливе народногосподарське значення. При її вирішенні автором на базі комплексного підходу до виробу принципів положень вивчені та розроблені недостатньо досліджені й нерозглянуті раніше питання теорії обмінних процесів і технології позапічної десульфуратції чавуну різними реагентами. Це дозволило розробити найбільш матеріало- і енергоекономічні, ефективні та надійні технологічні процеси позапічної десульфуратції чавуну низкою реагентів зі зниженням вмісту сірки аж до 0,001-0,003%, що підсилює актуальність та значимість роботи.

Мета роботи. Розробка і розвиток основних теоретичних положень і технологічних параметрів оптимальних варіантів процесів позапічної десульфуратції чавуну інжектуванням різних реагентів зі створенням найбільш матеріало- й енергоекономічних технологічних рішень на основі комплексного дослідження та аналізу закономірностей обмінних процесів у системі "метал-реагент- шлак- газова атмосфера".

Наукова новизна. Розроблені основні наукові положення та методологія концепції вибору параметрів оптимального процесу позапічної десульфуратції чавуну різними реагентами на базі широкомасштабних комплексних досліджень і їх аналізу.

Виконано системний аналіз існуючих наукових як літературних, так і власних даних в області позапічної десульфуратції чавуну.

З єдиних методичних позицій стосовно умов позапічного рафінування і з урахуванням можливих фазових перетворень реагентів при введенні їх у чавун визначено термодинамічні параметри комплексу реакцій між реагентами, компонентами чавуну, газовим середовищем й оточенням. У результаті теоретичного узагальнення великого обсягу інформації виведено рівняння для розрахунку величин змін ізобарно-ізотермічного потенціалу ряду реакцій, що протікають при позапічній обробці чавуну, на основі чого обґрунтовано вихідні умови реалізації оптимального механізму і найбільш раціональної схеми обмінних процесів.

Уперше розроблено й застосовано математичну модель для розрахунку параметрів нагріву, перетворення й спливання реагентів у рідкому чавуні. Виведені аналітичні вирази й одержано діаграми для оцінки співвідношення процесів нагріву, перетворення й спливання реагентів. Теоретично обґрунтовані оптимальні розміри частинок використаних реагентів та параметрів їх введення в розплав. Показано, що магній, на відміну від інших реагентів, при введенні в рідкий чавун необхідно попередньо перевести у стан пари.

Розроблені нові теоретичні уявлення про механізм процесу десульфуратції чавуну магнієм, який вводиться в розплав у струмені інжектуючих

газів. Показана пріоритетність і правомірність реалізації механізму взаємодії саме розчиненого у чавуні магнію з компонентами розплаву, газового середовища і ковшового шлаку.

Сформульовано основні положення методів вибору схеми та механізму реалізації обмінних процесів при десульфурзації чавуну в оптимальних умовах. Виведені і експериментально вивірені аналітичні вирази для розрахунку параметрів змішування чавунів з різним вмістом сірки після десульфурзації реагентами, які розчиняються і не розчиняються у чавуні.

Теоретично обґрунтовані і визначені умови, при яких інжектуючий газ, забезпечуючи потрібні умови перемішування, не чинить негативного впливу на процеси десульфурзації. Установлені величини оптимальних концентрацій реагентів у газовому середовищі.

Вперше теоретично вивчено і оцінено в порівнюваних умовах закономірності теплообмінних процесів при десульфурзації чавуну різними реагентами. За виведеними аналітичними виразами одержано діаграми для визначення утрат тепла у змінюваних умовах рафінування.

Проведені широкомасштабні експериментальні дослідження закономірностей процесів десульфурзації чавуну різними реагентами. Підтверджено теоретичні положення роботи, уточнено й прийнято критерії та константи. Одержано нові експериментальні дані щодо комплексу показників десульфурзації чавуну.

Вперше розроблені основні положення процесу позапічної десульфурзації чавуну з корегуванням складу газової атмосфери, ковшового шлаку і чавуну з метою підвищення ефективності рафінування та запобігання розвитку процесів ресульфурзації (повернення сірки в метал).

Вироблено вимоги щодо апаратного оформлення процесів десульфурзації та технологічного устаткування; експериментально установлено ряд закономірностей інжектування реагентів у розплав. Створені принципово нові конструкції фурм й устаткування для вдування реагентів у рідкий чавун.

Установлені закономірності і параметри пилоутворення з ковшів при введенні різних реагентів.

Сформульовані основні положення, вихідні вимоги й рекомендації для реалізації високоефективних процесів позапічної десульфурзації чавуну різними реагентами.

Практична цінність та реалізація результатів роботи. Розроблено оптимальні параметри промислових технологій десульфурзації чавуну у ковшах вдуванням різних реагентів (магнію, вапна, карбїду кальція, соди, композицій на їх основі) зі зниженням вмісту сірки до 0,001-0,005% й ступінню використання магнію 95%, вапна - до 20%, кальцінованої соди - до 37% й карбїду кальція - до 31%. Розроблено номограми для визначення типових витрат реагентів у залежності від умов здійснення десульфурзації чавуну.

Створено і проведено промислово перевірку матеріало- і енергоекономічних технологій десульфуратії чавуну різними реагентами з мінімальними їх витратами і найменшими втратами температури чавуну, в т.ч. при вдуванні гранульованого магнію - $5-7^{\circ}\text{C}$, порошкового вапна - 20°C .

Комплекс технологічних і технічних рішень даної роботи склав основу вихідних даних, технологічних рекомендацій та технологічних завдань на створення нових і модернізацію існуючих УДЧ та ВДЧ металургійних комбінатів "Азовсталь", ДМК ім.Дзержинського, "Криворіжсталь", "Запоріжсталь", Новоліпецького, ім.Ілліча, Магнітогорського, заводів ім.Петровського, "Свободний Сокіл" та інші.

Створені технології позапічної десульфуратії чавуну вдуванням гранульованого магнію і порошкового вапна засвоєні і впроваджені на металургійних комбінатах "Азовсталь", Новоліпецькому, "Запоріжсталь", ім.Дзержинського, "Криворіжсталь", ім.Ілліча; на заводах "Свободний Сокіл" і Лутугінському прокатних валків при виробництві високоякісних і відповідального призначення марок сталі та чавуну.

Технологічний процес десульфуратії чавуну гранульованим магнієм було продано за ліцензією АО "Раутарууккі" (Фінляндія) і реалізовано в обсязі 1,6 млн.т/рік на УДЧ Раахеського металургійного заводу.

Сумарне річне виробництво знесірченого чавуну за розробленими технологіями склало 7,15 млн.т/рік. Сумарний річний економічний ефект від впровадження та використання результатів роботи склав 19,587 млн. руб. (в цінах до 1990 р.) і 428 млрд. крб. (в цінах після 1990 р.) з долевим ефектом автора відповідно 5,31 млн. руб і 130,4 млрд. крб.

Апробація роботи. Матеріали дисертації докладено на Міжнародних конгресах ливарників (Москва, 1973 р.), Всесвітній магнієвій асоціації (Берлін, 1994 р., Сан-Франціско, 1977 р.), I-IV конгресах сталеплавильників (Москва, 1992, 1995, 1996 р.р., Ліпецьк, 1993 р.), 3-х Міжнародних семінарах (Москва, 1980, 1982 р., Магнітогорськ, 1990 р.), на 14-ти конференціях і нарадах СРСР та держав СНД, 5-ти Пленарних засіданнях Центрального правління науково-технічного товариства чорної металургії СРСР і України, 10-ти засіданнях Колегії Міністерств чорної металургії СРСР і України, а також на засіданні Бюро відділу фізико-технічних проблем матеріалознавства Національної Академії наук України.

Розробки за темою дисертації експонувалися на міжнародних виставках, ярмарках, ВДНГ СРСР й України і відмічено дипломами та медалями.

Результати досліджень і розробок автора з позапічної обробки чавуну магнієм є складовою частиною роботи, яка удостоєна Державної премії України в галузі науки й техніки.

Публікації. За матеріалами досліджень та розробок дисертації опублікована 101 стаття, одержано 34 авторських свідоцтв на винаходи і 16 за-

кордонних патентів (США, Німеччини, Франції, Швеції, Бельгії, Австралії та інших держав).

Обсяг роботи. Робота складається з вступу, 8 розділів, висновків, бібліографічного списку - 242 найменувань, має 252 сторінки машинописного тексту, 133 малюнки і 36 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Робота являє собою результат закінченого комплексу теоретичних і експериментальних досліджень, а також технологічних і технічних розробок з позапічної десульфуратії чавуну, виконаних автором в період з 1966 по 1997 рік в Інституті чорної металургії, а також на підприємствах України і Росії.

У першому розділі приведені результати системного аналізу наукового рівня й повноти проробки, а також показників існуючих у світовій практиці процесів десульфуратії чавуну у ковшах різними реагентами. Перелік аналізованих факторів включає питання термодинаміки, механізму й кінетики процесів, наявність методів регулювання процесів та їх надійність, параметри і властивості реагентів як десульфураторів, закономірності ряду масообмінних процесів, параметри двофазових потоків, що вдувають в розплав, показники ефективності й глибини десульфуратії чавуну, ступінь засвоєння реагентів, апаратурне оформлення процесів та інше. Визначено достатньо широке коло питань і параметрів, які в потрібній мірі вивчено. Показано, що ряд процесів при певних умовах забезпечують зниження вмісту сірки у чавуні до 0,005-0,010% і нижче.

Разом з тим при аналізі даних досліджень і розробок показано, що застосовані процеси мають недостатньо високий і стабільний рівень ресурсозбереження з огляду на ряд невирішених проблем та недоробок. Виявлено відсутність у повній мірі комплексного підходу в дослідженнях та розробках. Термодинаміка, механізм і кінетика процесів вивчені недостатньо глибоко і без належного системного аналізу (стосовно саме до умов ковшової обробки чавуну). Тепло- і масообмінні процеси не зорієнтовано у напрямку найбільш вигідних умов засвоєння реагентів. Оцінка впливу типу й параметрів інжектуючих газів базується на недостатньо глибокому аналізі процесів; відсутні порівняльні дані про вплив концентрації реагентів у газі-носії, глибини введення реагентів у розплав, маси металу, його температури та інших параметрів введення на засвоєння реагентів. Опущено питання впливу ковшових шлаків і атмосфери в ковші над розплавом. Недостатньо вивчено характеристики відходів, що утворюються при позапічній десульфуратії і, відповідно, не сформульовано рекомендації по екології. Відсутній науковий підхід до створення оптимальної апаратури і технологічного устаткування для вводу реагентів у рідкий чавун. Методично не зовсім коректно проводиться

порівняння різних технологій, в т.ч. без урахування переліку усіх показників і у непорівнюваних умовах. Не сформульовано комплекс вимог та положень, що забезпечують надійність керування процесами рафінування і найбільш матеріало- і енергоекономний режим позапічної десульфуратії чавуну.

Викладене є основною причиною низького ступеня використання реагентів і високої витратності значної частини реалізованих на практиці й запропонованих процесів ковшової десульфуратії чавуну. На базі виконаного аналізу та висновків автором сформульовані задачі досліджень і розробок дисертації.

У другому розділі викладено результати термодинамічного аналізу процесів, що протікають при ковшовій інжекційній десульфуратії чавуну різними реагентами. Показано, що при введенні реагентів у розплав відбуваються не тільки процеси нагріву, але й плавлення (Ca, Na₂CO₃, Al, CaSi та інш.), випарювання (Mg, Na, сплави), розпаду (карбонати, композиції) й розчинення в розплаві (Mg, Al, Si, сплави, композиції). Для реалізації реакцій взаємодії реагентів із сіркою чавуну ці процеси повинні закінчуватися на максимальній глибині оброблюваного розплаву.

Використовуючи термодинамічні характеристики реакцій розчинення магнію в чавуні:



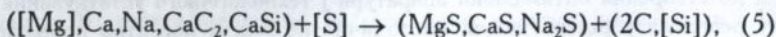
$$\Delta Z^{\circ}_{\text{T}} = -32032 + 23,33 \cdot \text{T}, \quad (2)$$

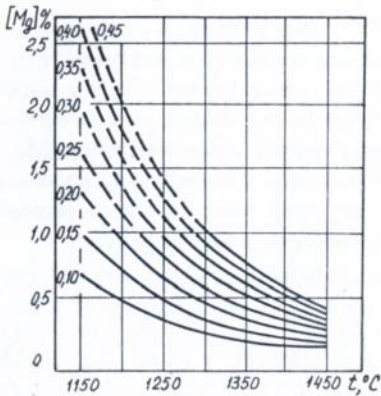
$$\lg K_p = 7000/\text{T} - 5,1, \quad (3)$$

$$\lg [\text{Mg}] = 7000/\text{T} - 5,1 + \lg P_{\text{Mg}}, \quad (4)$$

одержали діаграму граничного насичення чавуну магнієм (мал.1), яка показує, що величина [Mg] може досягти 1% і більше. [Mg] підвищується зі зниженням температури й збільшенням тиску. Для закономірності визначає особливі переваги магнію, через те, що реакція взаємодії розчиненого (а не газоподібного) у чавуні магнію ([Mg]) з сіркою у цьому випадку протікає не тільки в зоні його введення й активного барботування, але й за її межами. З урахуванням викладеного, а також даних діаграми (мал.1) найбільш оптимальною схемою використання магнію для десульфуратії чавуну визначено насичення розплаву магнієм і за рахунок сприятливих умов забезпечення взаємодії магнію з сіркою в усьому обсязі ванни, що обробляється.

За єдиною методологічною основою (в т.ч. стосовно умов позапічної обробки) одержані можливі комбінації взаємодії різних реагентів із сіркою чавуну і виведено вирази для розрахунку $\Delta Z^{\circ}_{\text{T}}$ реакцій. Показано, що процеси взаємодії металів (Mg, Ca, Na), карбіду та сілциду кальцію з сіркою чавуну протікають за найбільш простою прямою схемою - без інших "співчасників":





Мал.1. Залежність граничного насичення чавуну магнієм ($[Mg]$) від температури (t) та тиску (цифри біля кривих, МПа).

Щодо величини ΔZ°_T реакцій, то слід надати перевагу як реагентам для видалення сірки з чавуну магнію й кальцію. Сполуки типу карбідів та силіцидів кальцію віднесено до "сильних" десульфураторів, перевагами яких є те, що величина ΔZ°_T реакцій їх взаємодії з сіркою чавуну практично мало залежить від температури.

Показано, що реакції взаємодії усіх оксидів із сіркою чавуну протікають обов'язково з участю відновника (В), який зв'язує вивільнений кисень оксиду:



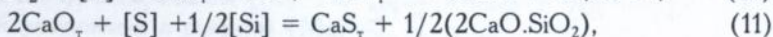
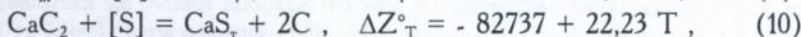
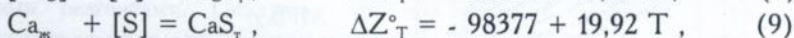
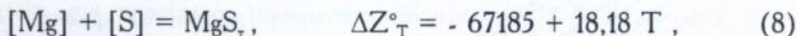
Із оксидів до найбільш ефективних знесірчувальних реагентів нами віднесено CaO і Na_2O .

При взаємодії їх із сіркою чавуну до відновників переважно належить кремній та алюміній, що розчинені в розплаві. Магній не рекомендовано використовувати як відновник через те, що стехіометрично кількість його для "розкислення реакційної зони" відповідає кількості магнію по прямій схемі (5) взаємодії його з сіркою розплаву, що, природно, більш раціонально.

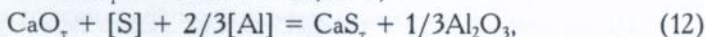
Установлено, що взаємодія карбонатів із сіркою чавуну протікає по достатньо складній багатоступеневій схемі з дисоціацією карбонатів, подвійними (у порівнянні з оксидами) витратами відновників з наступним етапом взаємодії з сіркою чавуну. При виключенні одного з відмічених етапів кооперативний процес видалення сірки з чавуну не реалізовується. В умовах інжекційної обробки найбільш прийнятним із карбонатів визначено Na_2CO_3 , кінцева реакція взаємодії якого з сіркою чавуну при участі $[Si]$ має вигляд:



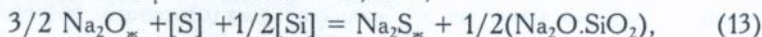
Одним із основних переваг Na_2CO_3 перед іншими карбонатами при позапічній обробці чавуну є те, що комплекс тепло- і масообмінних процесів при введенні соди проходить у більш сприятливих умовах. За результатами виконаного термодинамічного аналізу перелік рекомендованих знесірчувальних реагентів для ковшової десульфуратії чавуну нами обмежено Mg , Ca , CaC_2 , CaO , Na_2O , CaSi , Na_2CO_3 , можливими композиціями, сплавами та сумішами на їх основі. Прийнято й одержано наступні схеми реакцій та вирази для розрахунку термодинамічних параметрів (в т.ч. (7)):



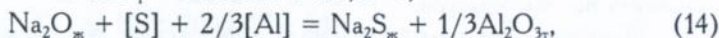
$$\Delta Z^\circ_T = -58584 + 22,05 T,$$



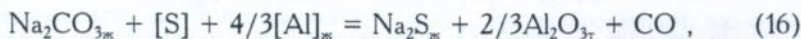
$$\Delta Z^\circ_T = -86736 + 12,29 T,$$



$$\Delta Z^\circ_T = -105519 + 27,15 T,$$



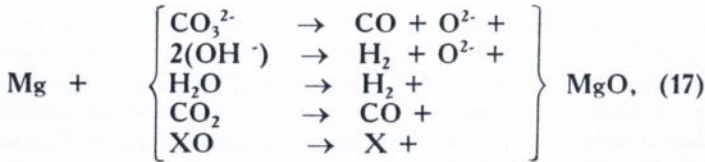
$$\Delta Z^\circ_T = -107666 + 18,28 T,$$



$$\Delta Z^\circ_T = -93658 + 14,5 T.$$

Як видно, можливі складові обмінних процесів розчинені в чавуні й це є одне з принципових положень обраного нами механізму. У цьому ж розділі роботи сформульовано основні положення щодо реалізації оптимальних (термодинамічно) схем процесів.

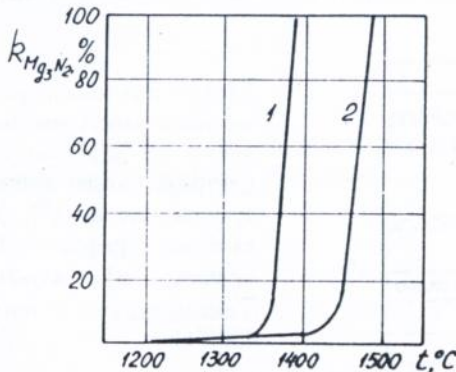
У зв'язку з неоднозначністю ряду наукових розробок, які є, та з огляду на особливі властивості магнію та його потенційні перспективи, в дисертації значну увагу приділено вивченню й аналізу процесів обробки чавуну магнієвими реагентами. Перш за все автором підкреслено вплив складу реагенту й атмосфери. Показано, що наявність в композиції складових типу CO_3^{2-} , OH^- , H_2O , CO_2 , O^{2-} та інших аналогів супроводжується їх взаємодією з магнієм:



і, відповідно, втратами магнію з окисленням. Це виявилось одним із аргументів введення магнію в чавун в "чистому" вигляді - без наповнювачів та домішок.

При аналізі закономірностей інжекційного введення магнію у чавун нами встановлено, що в об'ємі розплаву є умови для взаємодії магнію з киснем та азотом газу-носія. При фактично використаних параметрах вдування з киснем носія (в випадку використання повітря) може загубитись безповоротньо від 3 до 16% уведеного магнію. При використанні азоту в об'ємі чавуну магній з азотом утворюють нітриди; кількість звязаного у нітриди магнію може бути від 16 до 95%. Виконаний аналіз відкладень на зануреній частині фурм (при вдуванні магнію повітрям та азотом) показав, що їх основа (56% і більше) складається з оксидів та нітридів магнію. При спливанні на поверхню чавуну нітриди магнію можуть розкладатися (мал.2) за рахунок зниження тиску й можливого підвищення температури нітридів вище 1370-1400⁰С, проте процес виключення чи зменшення активної взаємодії магнію з оброблюваним розплавом уже відбувся.

У зв'язку з викладеним зроблено висновок про непридатність повітря та азоту для вдування магнію в рідкий чавун; використаний



Мал.2. Залежність кількості розкладених нітридів ($K_{Mg_3N_2}$) від температури при абсолютному тиску 0,1 МПа (крива 1) та 0,2 МПа (крива 2).

газ повинен бути гарантовано нейтральним до магнію, тобто це вуглеводневий газ, аргон і їх аналоги. Показано особливі переваги використання як газу-носія природного газу, тому що при вдуванні в чавун відбувається його розклад з локальним зниженням температури в зоні введення на 150-160°C, що сприяє підвищенню розчиненості магнію в рідкому чавуні. Одночасно за рахунок продуктів дисоціації газу підвищується активність сірки, створюється нейтральна й захисна атмосфера, в т.ч. над розплавом в ковші за рахунок водню.

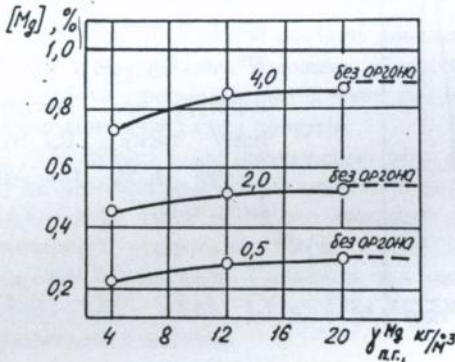
Показано, що нейтральний до магнію інжектуєчий газ може знижувати ефект десульфурації через зниження фактичного парціального тиску магнію (P_{Mg}^{Φ}) при зниженні концентрації його парів газом-носієм. Це відповідно повинно супроводжуватись зниженням вмісту розчиненого магнію ($[Mg]_p$) і зниженням вмісту сірки ($[S]_p$) в умовах їх рівноваги в чавуні.

Виконані за виразом

$$[Mg]_p = 10^{(7000/T - 5,1)} P_{Mg}^{\Phi} \quad (18)$$

розрахунки це підтверджують. Разом із тим установлено, що при концентрації магнію в нейтральному до нього газі-носії ($\gamma_{Mg_{n.r.}}^{Mg}$) 12 кг/м³ і більше вплив газу практично не відчутно (мал.3). Аналогічні висновки одержано при розрахунках $[S]_p$. З цієї причини умова $\gamma_{Mg_{n.r.}}^{Mg} > 12$ кг/м³ при вдуванні магнію нами визначена як оптимальна й істотна в переліку найсуттєвіших параметрів ефективної та керованої десульфурації чавуну в ковшах.

У третьому розділі показано результати пошуку оптимальних умов масо- і теплообміну між реагентами й рідким чавуном у ковшах. За розробленою автором методикою розрахунково-теоретичного аналізу процесів нагріву, перетворень та спливання частинок реагенту в розплаві сумарну тривалість



Мал.3. Залежність рівноважного вмісту магнію в чавуні ($[Mg]_p$) від концентрації магнію в інжектуєчому аргоні ($\gamma_{Mg_{n.r.}}^{Mg}$) та глибини (цифри біля кривих, м) вдування. Температура чавуну 1300°C.

цих процесів (τ_{Σ}) в загальному вигляді може бути визначено з виразу:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{н.т.} + \tau_{п.а.} + \tau_{н.ж.} + \tau_{к.} + \tau_{н.г.}, \quad (19)$$

де $\tau_{н.т.}$, $\tau_{п.а.}$, $\tau_{н.ж.}$, $\tau_{к.}$, $\tau_{н.г.}$ - тривалість процесів нагріву твердого, розплавлення, нагріву рідкого, кипіння (в т.ч. перетворення) і нагріву пароподібного реагенту відповідно.

У залежності від виду реагенту τ_{Σ} включає різні складові виразу (19). Для найбільш стійких реагентів (оксид кальцію, карбід кальцію та інших) τ_{Σ} включає в основі тільки $\tau_{н.т.}$. Для магнію, ряду карбонатів та їх композицій τ_{Σ} включає усі складові (19), а для алюмінію, кальцію, оксиду натрію та інших аналогів - тільки перші три ($\tau_{н.т.}$, $\tau_{п.а.}$, $\tau_{н.ж.}$).

Виведений вираз для розрахунків тривалості нагріву частинок (крапель, пухирків) реагенту в розплаві має вигляд:

$$\tau_{н.ч.} = \frac{r^2}{3 \text{ Bi} \cdot a} \ln \frac{\theta \sqrt{3 \text{ Bi} \cdot r}}{\text{Sin}(\sqrt{3 \text{ Bi} \cdot r})}, \quad (20)$$

де r , θ , Bi , a - радіус частинок, безрозмірна температура, критерій Біо й коефіцієнт температуропровідності відповідно.

Величина θ визначається за відомим виразом:

$$\theta = (t_{ж.ч.} - t_i) / (t_{ж.ч.} - t_{о.ф.}) \quad (21)$$

де $t_{ж.ч.}$, t_i , $t_{о.ф.}$ - температура чавуну, кінцева і-а й початкова температура даної фази реагенту.

Тривалість можливих процесів плавлення та випаровування частинок реагенту визначили з одержаних відповідних виразів:

$$\tau_{п.а.} = \frac{\rho_p \cdot r \cdot L_{пл.}}{3 \cdot a \cdot \alpha \cdot (t_{ж.ч.} - t_{п.а.})}, \quad (22)$$

де ρ_p , $L_{пл.}$, α - масова густина реагенту, питоме тепло плавлення та коефіцієнт тепловіддачі відповідно.

$$\tau_{к.} = \frac{\rho_{о.с.} \cdot \rho_p}{3 \cdot c \cdot (\rho_{в.} - \rho_{о.с.} - h_{ф.} \cdot \rho_{ж.ч.})}, \quad (23)$$

де $P_{o.c.}$, c , P_p , h_p , $\rho_{ж.ч.}$ - тиск навколишнього середовища, постійна випарювання, тиск насиченого пару реагента, глибина введення реагенту в чавун і густина чавуну відповідно.

Використовуючи вирази (19) - (23) і ряд інших, нами було одержано часткові вирази для розрахунку τ_{Σ} кожного із досліджених реагентів. Тривалість процесу спливання (τ_p) частинок (крапель, пухирків) реагентів у рідкому чавуні розраховували за формулою Стокса.

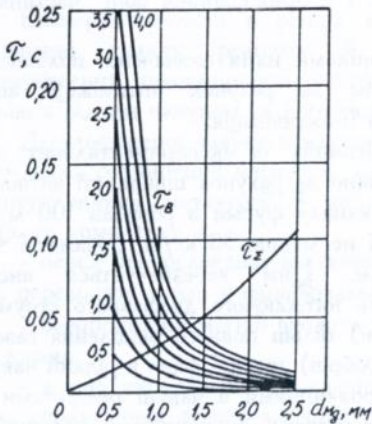
На основі викладеного було складено програму і виконано з використанням вичислювальної техніки розрахунки параметрів τ_{Σ} і τ_p для різних реагентів при змінюванні діаметру частинок від 0,1 до 8 мм та глибини вдування їх у розплав до 4,0 м. Виявлено, що тривалість процесів перетворень і нагріву частинок до температури чавуну може бути забезпечена не більше 0,03 с практично для усіх використовуваних диспергованих реагентів. Найбільшою вона є у магнію, кальцію та ряду карбонатів, що обумовлює створення спеціальних умов уведення їх у чавун. Показано, що "підготовка" частинок реагентів до хімічної взаємодії з компонентами чавуну забезпечується при розосередженому введенні їх у розплав, визначеному (індивідуальному для кожного) диспергованому складі реагенту та глибині його вдування.

Розроблені номограми співвідношення величин τ_{Σ} і τ_p при введенні різних реагентів (Mg, Ca, Na, CaO, CaC₂, CaCO₃ та інших) у рідкий чавун в залежності від діаметру їх частинок та глибини вдування дозволили сформулювати вимоги до режимів та умов введення. Рекомендована верхня межа діаметру частинок реагентів для фактичних умов їх використання складає для неметалевих реагентів не більше 0,1-0,2 мм, для кальцію - не більше 3,3-5,7 мм, для магнію - не більш 0,6-1,4 мм (в залежності від глибини розплаву в ковші). Останню умову було закладено в основу властивостей створеного для десульфуратції чавуну гранульованого магнію (а.с. №№325267,386571 та інш.) і способів його створення (а.с. №№461571, 384423).

Аналіз співвідношення величин τ_{Σ} і τ_p для різних умов обробки чавуну в ковшах засвідчує те, що незалежно від типу реагенту максимальне збільшення глибини його введення є позитивним фактором, який здатний у 2-3 рази збільшити τ_p , що сприятливо впливає на засвоєння реагентів.

При введенні магнієвих реагентів у рідкий чавун викладені раніш вимоги є необхідними, але недостатніми, бо при використанні характерних типорозмірів магнієвих реагентів величини τ_{Σ} і τ_p виявилися порівнювальними (мал.4). Тому введення в чавун магнію в "холодному стані" (в т.ч. вдуванням, у вигляді кусків, дроту та інш.) зумовлює недостатньо високе його засвоєння, тому що частина часу (після введення в розплав) витрачається на нагрів, плавлення та випарювання магнію. Наявність пасивуючих домішок до

магнію, що затримують теплообмінні процеси, може істотно посилювати ці негативні явища.



Мал.4. Залежність тривалості нагріву та фазових перетворень (τ_{Σ}), а також тривалості спливання (τ_c) частинок магнію в рідкому чавуні від діаметру частинки (d_{Mg}) і глибини введення у чавун (цифри біля кривих, м) у твердому стані.

За результатами викладеного аналізу вироблено наступні принципи положення оптимальних умов уведення магнію в рідкий чавун:

- тривалість нагріву, плавлення та випару магнію не повинні входити в загальний цикл спливання частинок магнію в чавуні, тобто перед безпосереднім уведенням у рідкий чавун потрібно забезпечити нагрівання та випарювання магнію;

- пароподібний магній повинен вводиться в розплав якомога ближче до дна ковша (на максимальній глибині);

- в реагенті не повинно бути пасивуючих домішок.

Достатньо надійним та простим рішенням реалізації цих положень є розроблений і поданий у дисертації процес (а.с. №№384406, 505682 та інш.) регульованого вдування гранульованого магнію через занурювану в розплав фурму з випарювальною камерою на виході, в якій за рахунок тепла оброблюваного чавуну забезпечується контроль випарювання магнію перед уведенням у розплав. Це дозволяє створити найбільш економічний варіант промислової технології позапічної десульфурзації чавуну.

При розробці раціональних параметрів кінетики та механізму процесу позапічної десульфурзації чавуну реагенти умовно можна розділити на 2 групи - здатні розчинятися в рідкому чавуні й нерозчинні. До першої групи із реально прийнятих речовин належить магній і композиції на його основі, до

другої - практично усі останні (вапно, карбід кальцію, суміші на їх основі й інш.)

При нерозчинних реагентах у чавуні основний комплекс обмінних процесів відбувається на поверхні частинок і в прикордонній зоні "частинка - метал".

Для цих умов пріоритетними чинниками нами визначено: поліпшення умов взаємодії реагентів з розплавом за рахунок оптимізації аеро-гідродинаміки в реакційній зоні й хімічна її активізація.

За наслідками розрахунково-аналітичних та експериментальних досліджень перший напрямок було реалізовано за рахунок швидкості витікання двофазного газопорошкового потоку із каналу фурми в розплав 100 м/с і вище, концентрації порошку в газі-носії не менше 30 кг/м³ і діаметрі частинок реагенту не більш 0,2 мм. Цим забезпечується висока "дальнобійність" та "пробивна" здатність витікаючого двофазного струменя з досягненням в наступному (в розплаві) більш повного відділення газової фази і глибокого проникнення (15-25 калібрів) твердої фази в рідкий чавун.

При таких режимах продувки нерозчинними в чавуні реагентами до самих важливих параметрів автором віднесена концентрація порошку в інжектуючому газі в межах 40-70 кг/м³ при питомій витраті газу 1,3-1,8 м³/г на 1 м² поверхні розплаву в ковші. Ці межі забезпечують оптимальне узгодження інтенсивності подачі реагенту і сірки в реакційну зону. Відхилення параметрів від наведених (в більший чи менший бік) супроводжується зниженням ефективності десульфурації. Глибина занурювання фурми (h_f) в розплав повинна бути не менше 90-95% від глибини ванни. Викладені положення підтвержені при продувках чавуну реагентами, що вміщують вапно та карбід кальцію.

Хімічна активізація реакційної зони в роботі вирішена за рахунок:

- високої дисперсності (не менше 0,1 мм) використовуваних реагентів;
- високого вмісту основного компоненту (CaO, CaC₂ та інш.) в реагенті, наприклад, для вапна склад визначено (%): CaO_{акт.} > 92%, SiO₂ < 0,7%, у.п.п. (утрати при прожарюванні) < 1,5%, волога не допускається;

- введення в реагент і в рідкий чавун активуючих домішок (соди, алюмінію та інш.);

- використання нейтральних та гарантовано сухих інжектуючих газів.

Обробка чавуну магнієм може включати два різних механізми взаємодії з сіркою - газоподібного магнію (пухирковий режим обробки) і розчиненого в чавуні. В даному розділі розвинено переваги другої схеми. Показано реальність забезпечення реакції (1) при будь-яких вмістах кисню і сірки в об'ємі ванни за рахунок локалізації процесів насичення чавуну магнієм в зоні вводу та барботування з наступною взаємодією [Mg] із [S]

й [O] як у зоні введення, так і за її межами (в об'ємі ванни). Ця схема може реалізувати паралельний хід взаємодії магнію з сіркою і киснем чавуну, чим можна пояснити недостатньо низький вміст кисню в знесірченому чавуні в ряді випадків.

Експериментально в різних ковшах (в т.ч. 420-т міксерних) при вар'юванні складу реагенту й умов розчинення нами одержано підтвердження правомірності вибраного механізму взаємодії розчиненого магнію з рідким чавуном та його складовими.

Десульфуратія чавуну з максимальною оптимізацією "роботи" механізму через розчинений магній є науковою основою комплексу розробок Інституту чорної металургії й автора в тому числі. Базовими положеннями цього комплексу є:

- перед безпосереднім введенням у розплав магній гарантовано і керувано переводять у пар у випарювальній частині фурми;

- пароподібний магній вводять у розплав на максимальній глибині біля дна ковша;

- в зоні випарювання, введення й розчинення магнію створюють комплекс сприятливих фізико-хімічних умов (парціальний тиск магнію, температура, газова атмосфера та інш.) для цих процесів;

- обмінні процеси оптимізують вдуванням відновлювального або нейтрального до магнію газу при низьких витратах ($< 50 \text{ м}^3/\text{г}$) останнього і високій концентрації в ньому магнію (більше $12 \text{ кг}/\text{м}^3$);

- система інжектування і дозування магнію чітко орієнтована на керуване випарювання магнію і пароутворення у ванні;

- склад газової атмосфери й шлаку в ковші при обробці коректують, виключаючи окислення магнію (в т.ч. розчиненого в чавуні) і запобігаючи процесу ресульфуратії.

Створений на цій основі технологічний процес обробки чавуну вдуванням диспергованого магнію (а.с. №№386567, 1106154, 1549079, 1217885, 1351091, патент США №3.880.411, Німеччини №2321495 та інш.) забезпечив найбільш високе (з відомих аналогів) засвоєння магнію (90% й вище).

З урахуванням можливості застосування наведених типів реагентів (розчинних і нерозчинних в чавуні) аналітично і експериментально вивчено закономірності змішування знесірчених цими реагентами чавунів (з різним вмістом сірки). Показано, що при десульфуратії немагнієвими реагентами змішування чавунів підлягає звичайним законам усереднення, а вміст сірки в змішуваному чавуні ([Sc]) визначається із виразу:

$$[\text{Sc}] = [\text{Sn}] \cdot \alpha_n + [\text{So}] \cdot (1 - \alpha_n), \quad (24)$$

де $[Sn]$, $[So]$, α_n - відповідно вміст сірки в необробленому чавуні, в знесірченому чавуні і доля необробленого чавуну при змішуванні.

При десульфурації магнієвими реагентами насичення чавуну магнієм впливає на вміст сірки в змішаному чавуні, зменшуючи його аж до 0,005% (при змішуванні знесірченого і звичайного чавунів) за рахунок реалізації механізму взаємодії $[Mg]$ із $[S]$ чавуну з більшим вмістом сірки. Кінцевий вміст сірки в чавуні ($[Sk]$) після змішування може бути визначений з наступних виведених і перевічених виразів:

$$[So] = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4k\eta(1 - \alpha_n)^2 \cdot 0,76}}{1,52 \cdot (1 - \alpha_n)}, \quad (25)$$

$$A = 0,76 \cdot \alpha_n [Sn] + (k / [Sk]) - 0,76 \cdot [Sk], \quad (26)$$

де k , η - константа в урівноваженій системі $[S] - [Mg]$ і коефіцієнт за-своєння $[Mg]$ при змішуванні чавунів.

Одержані вирази перевірені нами при змішуванні чавунів в міксерному відділенні комбінату "Азовсталь", в т.ч. для визначення потрібного вмісту сірки в знесірченому чавуні й витрат реагенту (в т.ч. магнію) при заданому вмісту сірки в чавуні після змішування.

У четвертому розділі викладено вперше виконані системні теоретичні та експериментальні дослідження теплообмінних процесів при десульфурації чавуну в ковшах різними реагентами (Mg , Ca , Na , CaO , CaC_2 , $CaSi$, $CaCO_3$, Na_2CO_3) вдуванням їх різними газами (повітря, азот, аргон, природний газ) з питомими витратами від 0,1 до 24 кг/т чавуну і забезпечення ступеня десульфурації від 20 до 95%. Показано задовільне співпадання розрахункових та фактичних даних.

Установлено, що позапічна десульфурація у всіх випадках пов'язана зі зниженням температури металу. Основними статтями витрат тепла є витрати на нагрівання й перетворення реагенту (8,8-68,6% витратної частини балансу), з випромінюванням барботованої поверхні розплаву (7,6-23,8%), нагрівання футеровки ковша (6-24,8%), фурми (7,7-24,8%) й ковшового шлаку (3,9-15,9%). Тип інжектуючого газу практично не впливає на величину зниження температури чавуну (Δt), яка лінійно збільшується зі зростанням витрат реагенту (q) за такими виразами (для доменних чавуновозних ковшів відкритого типу):

$$\Delta t_{CaC_2} = 2,5 \cdot q \quad (27)$$

$$\Delta t_{CaO} = 4,0 \cdot q \quad (29)$$

$$\Delta t_{Na_2CO_3} = 10,7 \cdot q \quad (28)$$

$$\Delta t_{Mg} = 19,4 \cdot q \quad (30)$$

Залежність Δt від ступеня десульфурації чавуну (Ст.Д) для усіх реагентів є кривою другого порядку. Установлено, що при однаковій Ст.Д втрати температури чавуну при десульфурації зростають у такому порядку застосування реагентів: $\text{Ca} \rightarrow \text{Mg} \rightarrow \text{CaC}_2 \rightarrow \text{CaSi} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3$. Найменше зниження температури чавуну ($5-10^\circ\text{C}$) одержано в розробленому процесі вдування магнію, найбільше (аж до 100°C) - при вдуванні карбонатів. З погляду викладеного карбонати не рекомендовані нами як реагент для знесірчування. Прийнятним визначено зниження температури чавуну при вдуванні магнію, карбиду кальцію та високоякісного вапна.

Виявлено сприятливий вплив збільшення маси оброблюваного чавуну (G_c) на зменшення швидкості зниження температури металу ($\Delta t/\tau$, $^\circ\text{C}/\text{хв.}$). Установлена залежність при вдуванні магнію, яка має вигляд:

$$\Delta t/\tau = 6,32 \cdot e^{-0,0063 G_c} \quad (31)$$

при вдуванні вапна:

$$\Delta t/\tau = 11,1 \cdot e^{-0,0087 G_c} \quad (32)$$

Використання цієї залежності для корегування умов десульфурації чавуну дозволяє при збільшенні G_c з 70-80 до 200 т зменшити $\Delta t/\tau$ при обробці магнієм із $3^\circ\text{C}/\text{хв.}$ і вапном із $6^\circ\text{C}/\text{хв.}$ до $1,5-2,0^\circ\text{C}/\text{хв.}$, що особливо важливо у тому випадку, коли застосовують вапно. Це пояснюється тим, що загальне зниження температури чавуну за термін обробки вапном знижується до $15-20^\circ\text{C}$, і цей процес за витратами наближається до найбільш енергоекономного вдування диспергованого магнію через фурму з випарювачем на виході. Тому обробка чавуну у великих заливальних ковшах визначена в роботі як найбільш енергоекономна. Для прогнозування змін температури чавуну при десульфурації в ковшах різними реагентами розроблені відповідні діаграми.

У п'ятому розділі викладено наслідки експериментальних, дослідних та дослідно-промислових обробок чавуну в ковшах при різних умовах і параметрах рафінування для уточнення та перевірки розроблених наукових положень і рекомендацій.

Показано, що інжектуючі гази повинні бути сухими (або висушеними) зі вмістом води не більше $0,17 \text{ г/м}^3$ (точка роси мінус 40°C) при вдуванні магнію і не більше $0,005 \text{ г/м}^3$ (точка роси мінус 70°C) при вдуванні карбиду кальцію, вапна, соди та їх сумішей.

Результатами дослідно-промислових продувок чавуну показано, що оптимальна концентрація магнію в газі складає не менше 12 кг/м^3 і немагнієвих реагентів - $40-70 \text{ кг/м}^3$. При цих значеннях $\gamma_{\text{п.г.}}$ установлено, що при вдуванні немагнієвих реагентів азот і повітря є практично рівнозначними (щодо ефекту десульфурації) газами-носіями, а природний газ підвищує ступінь використання, наприклад, вапна на $5-10\%$ (відносних). При більш високих концентраціях ($95-105 \text{ кг/м}^3$) заміна стиснутого повітря природним

газом підвищує ступінь використання, наприклад, K_{CaO} підвищується з 5-15 до 7,5-20%. Це обумовлено, на наш погляд, оптимізацією перемішування розплаву при розкладанні природного газу та позитивним впливом вуглецю та водню, які при цьому виділяються, на обмінні процеси.

При десульфурації чавуну магнієм (гранульованим та зернистим) виявлено, що при вдуванні повітрям або азотом зниження їх витрат зі 170 до 100-110 м³/г, а потім до 40-60 м³/г і, відповідно, збільшені $\gamma_{п.г.}^{Mg}$ з 3-6 до 12 кг/м³ ступінь засвоєння магнію K^{S+Mg}_{Mg} (на видалену сірку і [Mg]) підвищується із 40 до 80%. Збільшення K^{S+Mg}_{Mg} з підвищенням $\gamma_{п.г.}^{Mg}$ встановлено також при вдуванні магнію природним газом і аргоном. Заміна повітря (чи азоту) природним газом підвищила ступінь засвоєння магнію на 25-30% (відносних). Аналогічну дію (але в ряді випадків в меншій мірі) виявляє аргон. Показаний позитивний вплив зниження витрат газу-носія, підвищення концентрації в ньому магнію та використання нейтральних до магнію газів обумовлено виключенням утрат магнію з киснем й азотом носія, а також більшою розчинністю магнію в чавуні. Одержані результати в наступному підтверджуються широкою промисловою перевіркою на ряді металургійних комбінатів.

При вдуванні різних реагентів (вапна, магнію, сумішей і композицій) встановлено, що збільшення глибини занурення фурм в розплав з 0,4 до 3,8 м стабільно супроводжується безперервним підвищенням ступеня засвоєння реагентів (як магнієвих, так і немагнієвих). При використанні реагентів з вапном показана надійна глибока десульфурація чавуну (80-90%) при $h_p > 2,5$ м. Це є одним із суттєвих аргументів здійснення десульфурації чавуну в заливальних великих ковшах.

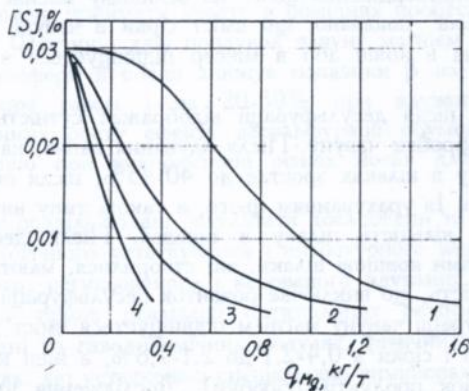
Комплекс одержаних показників десульфурації доменного чавуну різними реагентами (магнієм, кальцієм, вапном, содою, карбідом кальцію та інш.) дозволив обґрунтувати пріоритетність магнію та вапна. При використанні CaO-вмістних реагентів за рядом показників визначено ефективним застосування вапна в суміші з домішками, із яких найбільш раціональною є кальційована сода. Оптимальний вміст соди в суміші встановлено в межах 10-15% при масі оброблюваного чавуну 50-80 т і 5-10% - при масі 100 т і більше.

При вдуванні магнієвмістних реагентів збільшення $Mg_{акт}$ в реагенті з 20 до 90-92% однозначно підвищує ступінь засвоєння магнію в 1,7 рази і питому ступінь десульфурації D_{Mg} (від одиниці введеного магнію) в 1,58 рази. Цим підтверджено положення про необхідність використання магнію без пасивуючих і збіднюючих домішок.

Результати продувок чавуну содою і карбідом кальцію засвідчують те, що для десульфурації ці матеріали можуть бути використаними в тому вигляді, в якому вироблені (але в подрібленому вигляді).

Досліджено і оцінено вплив умов і способу введення магнію в розплав на його засвоєння. Показано, що більшість інжекційних процесів введення диспергованого магнію забезпечує більш високі значення K_{Mg} і D_{Mg} , чим інші способи. Найбільш значимими чинниками забезпечення високого ступеня засвоєння магнію виявлено параметри, які поліпшують його розчинність у рідкому чавуні. За масивами продувок чавуну в доменних ковшах виявлено, що перехід до керованого вдування магнію без добавок через фурму з випарювачем на виході при $\gamma_{n.r.}^{Mg} > 12 \text{ кг/м}^3$ й застосуванні природного газу підвищує K^{S+Mg}_{Mg} в середньому до 85% і D_{Mg} до 25% (на 0,1 кг/т введеного магнію), завдяки чому питома витрата магнію знижується (крива 3, мал.5) в 2,4-4,0 рази (проти кривої 1).

Установлено локальне зниження температури чавуну в зоні вдування магнію природним газом на $80-120^\circ\text{C}$, що сприяє більшій розчинності магнію (мал.1) і підвищує K^{S+Mg}_{Mg} в 1,25-1,45 рази.



Мал.5. Залежність вмісту сірки в чавуні ($[S]$) від витрат (q_{Mg}) магнію.

- 1- суміш магнію з вапном чи доломітом, в ковші 85-90 т чавуну;
- 2 - гранульований магній, вдутий повітрям через фурму з випарювачем, 85-90 т чавуну;
- 3 - гранульований магній з природним газом, 85-90 т чавуну;
- 4 - гранульований магній з природним газом (аргоном), 280 т чавуну.

Комплексне поліпшення умов розчинності магнію в чавуні за рахунок вдування магнію без добавок, забезпечення $\gamma_{n.r.}^{Mg} > 12 \text{ кг/м}^3$, застосування природного газу чи аргону, використання фурми з випарювачем, зниження температури і підвищення тиску в зоні введення (за рахунок $h_p > 2,5 \text{ м}$)

збільшує засвоєння магнію до 95% (при кінцевому вмісті сірки біля 0,005%) й, відповідно, знижує витрати магнію до мінімально можливого (крива 4, мал.5), а показника β - до 1,0-1,1 кг/кг, що не має аналогів в інших процесах десульфурації. Цей комплекс параметрів реалізується при обробці чавуну магнієм у заливальних (особливо у великих) ковшах.

Оптимізація умов інжекційної позапічної обробки чавуну в роботі вперше вирішується спільно з урахуванням параметрів ковшових шлаків і атмосфери над розплавом. Установлено, що кількість вихідних ковшових шлаків знаходиться в межах від 0,2 до 7% (від маси чавуну), а по типу вони являють собою звичайно грубі гетерогенні конгломерати, в яких міститься 30-35% корольків (кулькоподібних включень) й вихлюпів чавуну. Неметалева частина цих шлаків, як правило, істотно відрізняється від звичайних доменних шлаків, має основність 0,4-0,8, не володіє сіркопоглинальною здатністю і потенційно схильна до розвитку процесів ресульфурації. На підтвердження цього на великому масиві даних в умовах комбінату "Азовсталь" показано, що вміст сірки в чавуні у процесі переливів його із ковша в ковш або в міксер підвищується в середньому на 0,01%.

Вміст шлаків після десульфурації відображає сутність способу, який застосовують для обробки чавуну. Після вдування вапна, карбїду кальцію й магнію вміст металу в шлаках зростає до 40-45%, після обробки содою - знижується до 10%. Із урахуванням цього, а також типу використаних реагентів, змінюється кількість шлаку в ковшах. Після десульфурації не-магнієвими реагентами ковшові шлаки, які створилися, мають достатньо високу сульфідну ємкість, що виключає розвиток ресульфурації.

При десульфурації чавуну магнієм підвищується вміст MgO в шлаці з 4,2-9,1 до 6,7-13% і сірки з 0,4-2,1 до 2,1-7,8%, а інші компоненти знижуються (за рахунок продуктів обробки). Дослідження властивостей цих шлаків виявило їх недостатню сіркопоглинаючу здатність, що на практиці приводить до підвищення витрат магнію (показника β) на 10-15%. Установлено також, що якщо шлаки після десульфурації магнієм не зчищаються, а вміст в чавуні $[Mg] < 0,01\%$, то при зливі в міксер або при переливах чавуну в інший ковш вміст сірки в ньому може збільшитися. Розчинений в металі магній є захисним бар'єром, що перешкоджає поверненню сірки із шлаку в чавун. Виключення негативних процесів ресульфурації нами було реалізовано (а.с. №1217885) підвищенням сульфідної ємкості шлаків за рахунок уведення корегувальних домішок (1-3 кг/т чавуну в доменні ковші і 0,5-1,0 кг/т в заливальні ковші) фракціонованих матеріалів (1,5-10 мм) на основі CaO і MgO (в т.ч. їх відходів). Цим було забезпечено також зниження показника β при дослідних продувках чавуну магнієм на 25%, а на промислових серіях - на 15% при гарантованому виключенні розвитку про-

цесів ресульфуратії при усіх операціях переливів чавуну від доменної печі до конвертеру.

Аналізи вмісту газової атмосфери в ковшах (під кришками) при продувках чавуну магнієм виявили середній вміст кисню 17%, азоту - 79,5%, діоксиду вуглецю - 2,1%. Зважаючи на це відмічено сприятливі умови для зниження ефекту ресульфуратії (за рахунок окислення в чавуні магнію киснем атмосфери). Герметизація простору над розплавом (усунення великих щілин між кришкою і ковшами) змінює вміст атмосфери в бік: $O_2 < 10\%$, $N_2 > 84\%$ і $CO_2 \sim 4,5\%$. Таке ж корегування атмосфери досягли при вдуванні природного газу за спеціальною схемою під кришку ковша з витратами газу $160 \text{ м}^3/\text{г}$ при обробці в доменних ковшах; тобто біля $15-20 \text{ м}^3/\text{г}$ на 1 м^2 поверхні розплаву в ковші. В цих умовах (через відсутність надлишкового тиску над розплавом) не відбувається взаємодії $[Mg]$ з азотом атмосфери; розчинений магній, який не встиг реалізувати свій знесірчувальний потенціал на етапі випливання, не окислюється при барботуванні поверхні чавуну, а продовжує приймати участь в обмінних процесах у всьому об'ємі ванни розплаву. Фактичні дані продувок чавуну магнієм показали, що таке корегування атмосфери в ковші знижує показник β на 13% при вдуванні магнію природним газом і на 20-30% при вдуванні магнію азотом (повітрям). Різниця росту ефекту десульфуратії обумовлена неоднаковим засвоєнням магнію при використанні різних носіїв для його вдування в рідкий чавун.

У шостому розділі подані результати досліджень та розробок основних елементів технологічного устаткування і апаратурного комплексу для забезпечення надійного, регульованого і керованого вдування різних реагентів у рідкий чавун, а також реалізації оптимальних режимів процесів. Дослідження виконані на газодинамічних модулях, фізичних моделях та промислових установках, які устатковані спеціальною вимірювальною апаратурою з автоматичним одночасним записом усіх параметрів, в т.ч. миттєвих.

Фактичні результати експериментів показали, що процес вдування диспергованих реагентів усіх типів супроводжується вібраціями, коливаннями та знакозмінними нагрузками на елементи обладнання і металоконструкції установок, основною причиною яких є нерівномірне газоутворення, барботування рідкої ванни та пульсації при вдуванні двофазних потоків у розплав. Визначено власні вимушені частоти, а також амплітуди коливань елементів технологічного обладнання при продувці чавуну. Установлені навантаження, які діють в основних вузлах обладнання, а також їх залежність від інтенсивності продувки. З урахуванням цих даних удосконалювали технологічне устаткування УДЧ і ВДЧ.

Установлено, що наявність та рівень пульсацій і нерівномірність при вдуванні реагентів у розплав обумовлює характер барботування чавуну у

ковші. При постійних середніх витратах реагентів за одиницю часу нами визначені миттєві коливання цієї величини з відхиленням у меншу чи в більшу сторону $\pm 40-45\%$ від середніх значень. Зразу ж за миттєвим збільшенням масової витрати реагенту іде збурення металу, або навіть його викид із ковша. Тому забезпечення найбільшої рівномірності і мінімальних пульсацій при інжекційному введенні реагентів у розплав є одним із важливіших вимог до технологічного устаткування УДЧ.

Незалежно від системи дозування і подачі диспергованих матеріалів виявлено, що поштовхи тиску на виході із каналу фурми (від рідкого чавуну) впливають на зміну тиску і миттєві витрати матеріалів практично в кожному поперечному перерізі інжектувальної магістралі по довжині (аж до витратного дозувального бункеру). Найбільша сприйнятливість від зовнішніх збурень виявлена у аераційних пневможивильників, менша - у роторних.

Показано, що мінімальні пульсації та нерівномірності в подачі реагентів ($\pm 4\%$ й менше), в т.ч. й обумовлені зовнішніми некерованими чинниками і збуреннями, при використуванні аераційного пневможивильника досягається при забезпеченні дозованого перепаду тиску (над шаром матеріалу в бункері-дозаторі і змішувальній аерокамері) не менше 0,3 МПа. При роторному дозаторі це забезпечується його виконанням багаторядним (більше 2-3 рядів) упродовж площини обертання та ступеневим зміщенням комірок дозатора в цьому ж напрямку.

За результатами досліджень режимів і закономірностей вдування матеріалів у рідкий чавун на глибину до 3,8 м різними дозаторами вироблені вимоги щодо конструкції й параметрів їх роботи. Аераційний пневможивильник визначено нами як найбільш прийнятний для вдування дрібнодисперсних порошкових матеріалів (вапна, карбиду кальцію, сумішей), з більшою інтенсивністю (більше 30 кг/хв) подачі реагентів і концентрацією порошку в газі-носії більше 20 кг/м³. Установлено, що аераційну частину цього дозатора має бути виконано конусною з кутом нахилу лінії насипного матеріалу до горизонталі не менше 78°, псевдозрідження порошку повинно здійснюватись безперервно по всій висоті аераційної зони (не менше 1,4 м) з регульованою витратою аеруючого газу в межах 40-80 м³/г при напорі газу в цьому пристрої не менше 0,3 МПа і вмісту вологи в технологічному газі не більше 0,005 г/м³.

Для вдування зернистих та гранульованих реагентів рекомендовано і прийнято роторний дозатор з плавною регульованою швидкістю обертання ротору. Для виключення обтікання матеріалу поза ротором зазор між ротором і корпусом повинен бути не більше 0,5 мм. Більш висока надійність і рівномірність застосування механічних дозаторів у системі інжекційного введення диспергованих реагентів у розплав було досягнуто за рахунок викори-

стання розробленої конструкції (а.с. №1294838) об'ємних сит в системі пневмотранспорту.

Виконані дослідження й широка промислова перевірка дозволили визначити найбільш принципові й основні конструктивні параметри складових апаратурного комплексу десульфурації чавуну, в т.ч. матеріалопроводів (а.с. №1351091), фурмених пристроїв (а.с. №№384406, 293855, 735638), системи дозування (а.с. №№ 1339964, 1632895 та інш.) й ряд іншого технологічного та допоміжного устаткування. Виявлено, що для вдування порошкових немагнієвих реагентів достатньо надійним є застосування фурм з постійним діаметром каналу, удосконалених нами (а.с. №367154) в частині їх футерування набивними та наливними вогнетривкими сумішами. Найбільш ефективне, стійке і надійне вдування магнію в рідкий чавун із реалізацією усіх вироблених нами оптимальних положень та параметрів забезпечується при використанні фурми з випарювачем на виході в поєднанні з розробленими параметрами (а.с. №1351091) підвідного матеріалопроводу та випарювача (а.с. №384406 та інш.) у вигляді конуса з внутрішнім діаметром основи 400-350 мм й висотою 700-800 мм.

Надійна робота промислових УДЧ та ВДЧ досягнута також за рахунок створення оптимальних технологічних та технічних рішень за допомогою технологій й устаткуванням (а.с. №№ 1235222, 1592303 та інш.), в т.ч. фурменними пристроями і їх приводами, виготовленням фурм, обслуговуванням фурм, підготовці реагентів безпосередньо на УДЧ, системам керування і ряді інших.

В обсязі виконаного комплексу розробок створено декілька типів досвідно-промислових, а потім промислових установок та відділів десульфурації чавуну, на яких було забезпечено надійні і керовані умови обробки чавуну рядом реагентів у ковшах різних типорозмірів. На основі цього в наступному були розроблені найбільш досконалі принципові апаратурні схеми, які використали на знову утворених та спроектованих об'єктах позапічної обробки чавуну.

У сьомому розділі викладено результати досліджень екології при позапічній десульфурації чавуну у ковшах. Показано, що незалежно від використання способів і ступеня засвоєння реагентів, процеси позапічної обробки супроводжуються пилогазовими викидами із ковшів (15-30 тис. м³/г диму в газоході), які потребують, щоб їх видаляли та очищали. Менша кількість диму (12-15 тис. м³/г) виділяється із ковша при спокійній технологічній продувці й зменшенні кількості засмоктаного в ковш атмосферного повітря, більша (25-30 тис. м³/г) - при бурхливій (нетехнологічній) обробці та при десульфурації кальцінованою содою.

Характерна температура виділених при обробці вапном газів біля 280⁰С (з можливими короткочасними підвищеннями до 380⁰С), магнієм - в

межах 160-280°C, карбідом кальцію - 140-185°C, кальцінованою содою - 400-600°C.

За своїм складом газова фаза диму вміщує (у відхідному газоході): O_2 - 17,4-19,1%; CO_2 - 0,8-4,1%; CO - 0,08-0,49%; N_2 - практично все останнє. За кількістю CO , NO_x , SO_x і C_2H_2 дим, що виділяється при обробці чавуну, не потребує спеціальних заходів по очищенню (висновки НВО "Енергосталь"). При продувці чавуну карбідом кальцію дим містить ацетилен, що обумовлено взаємодією викинутих із ковшів частинок CaC_2 з вологою навколишньої атмосфери, тому його кількість збільшувалась зі зростанням вологи у атмосфері. Через це використання карбідвмістних реагентів потребує (з урахуванням роботи УДЧ під час дощу чи зупинок) спеціальних заходів контролю та безпеки в системі газоочищення щодо запобігання вибухонебезпечних концентрацій ацетилену. З усіх варіантів утворення димових викидів до найменш шкідливих відносяться гази, які виділяються із ковша при вдунанні магнію (O_2 - 19,1%; N_2 - 79,9%; CO_2 - 0,8%; CO - 0,08%; SO_x - 2,5 мг/м³; NO_x - 18,1 мг/м³).

Фактичні дані вимірів показали, що вміст пилу в димі, який виділяється при десульфурації, змінюється в широких межах - від 1 до 35 г/м³. Установлена залежність цієї величини від складу використаного реагенту, способу його введення в чавун, параметрів введення, ступеня засвоєння, складу і типу шлаку в ковшах, характеру обробки та інших параметрів. Основними чинниками зниження вмісту пилу у відхідних газах нами визначено: забезпечення високого ступеню засвоєння реагентів, виключення пульсацій в подачі реагенту, зниження інтенсивності введення, зменшення витрат газу-носія, зниження бурхливості процесу обробки чавуну, виключення в складі шлаку графіту, розрідження ковшових шлаків, застосування кришок на ковшах при десульфурації, зменшення підсосу атмосферного повітря та інше. Виконання цих положень знижує запиленість виділеного диму до 1-4 г/м³. Пил, що виділяється із ковша при десульфурації різними реагентами, являє собою дрібнодисперсний порошок діаметром частинок менше 100 мкм. Основними складовими пилу є оксиди заліза (14,6-56,3%), вуглеця (2,1-61,8%), сіліція (1,3-5,2%), сірки (0,1-1,3%) та інші сполуки на основі реагентів, що вдуюються при введенні: магнію - MgO (до 24%); вапна та карбиду кальцію - CaO (до 38%); соди - Na_2X_m (до 11,9%). Для видалення цього пилу здатні газоочистні споруди як "сухого", так і "мокрого" типів. При десульфурації карбідом кальцію газоочистка повинна оснащуватись системою контрольованої нейтралізації CaC_2 , який входить в пил до 1%.

Після десульфурації чавуну вапном і карбідом кальцію важливою складовою (40-45%) ковшових шлаків є "корольки" та включення металу. Вміст сірки в них змінюється від 0,06 до 1,23% і залежить від вмісту сірки

в шлаці і розмірів “корольків”. Вміст сірки в “корольках” чавуну після десульфурації вапном та карбідом кальцію може досягати 0,1%, магнієм - до 1,3%. Шлаки після десульфурації содою містять металу не більше 10%. Внаслідок цього добавка соди до ковшових шлаків є дійовою мірою зниження витрат металу зі шлаком.

Аналіз неметалевої фази утворених шлаків показав, що після десульфурації вапном, магнієм та композиціями на їх основі шлаки є нетоксичними й належать подальшій переробці й утилізації за технологіями, які мають металургійні підприємства.

Після обробки карбідом кальцію ковшовий шлак вміщує 4,5-6,5% CaC_2 . Нашими дослідженнями встановлено, що при охолодженні на повітрі до 90°C і нижче такий шлак виділяє ацетилен, а при попаданні на шлак води ацетилен інтенсивно виділяється при 400°C і нижче. Тому шлаки після десульфурації карбідом кальцію потребують спеціальних заходів по локалізованій нейтралізації CaC_2 . Це ж відноситься і до використовуваного устаткування (ковші, шлакові чаші та інш.). Шлаки, які утворюються після обробки чавуну кальцінованою содою, збагачуються оксидом натрію до 16-28%, тому потребують переробки з видаленням натрійвмістних сполук.

У роботі викладено рекомендації щодо використання пилу, видаленого при десульфурації чавуну, та утворених ковшових шлаків як вторинної сировини.

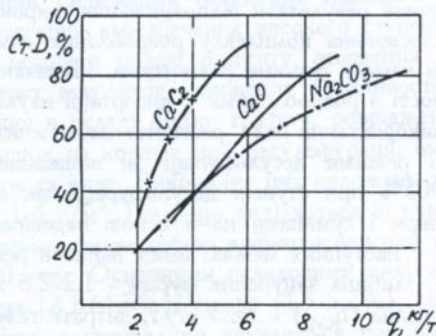
У восьмому розділі подано основні результати відпрацювання широкої дослідно-промислової перевірки та засвоєння комплексу розроблених нами технологічних процесів десульфурації чавуну різними реагентами. Показано, що реалізація технологій у відповідності з розробленими в дисертації науковими положеннями дозволяє при використанні ряду реагентів забезпечити найбільш економічні та оптимальні режими десульфурації зі зниженням вмісту сірки в чавуні до 0,001-0,005% при ступені десульфурації аж до 98%. Показники десульфурації вапном і сумішами на її основі перевірені при вар'юванні основних параметрів у наступних межах: вміст вапна в реагенті - 75-100%, $\text{CaO}_{\text{акт.}}$ - 48-92%, глибина занурення фурми - 1,2-2,8 м, $\gamma_{\text{п.г.}}$ - 40-150 кг/м^3 , питома витрата вапна (q_{CaO}) - 2-23 кг/т , витрати газуносія - 50-180 $\text{м}^3/\text{г}$, утрати при прожарюванні вапна - 1,0-11,3%, вміст води в газі-носії - 0,005-0,60 г/м^3 і ряд інших. По масивам промислових продувок встановлено, що ресурсозберігаюча і ефективна технологія десульфурації чавуну вапном повинна відповідати наступним основним вимогам: $\text{CaO}_{\text{акт.}} > 90-92\%$, $h_{\text{ф}} > 2,5$ м, у.п.п. < 2%, маса чавуну в ковшах > 150 т, $\gamma_{\text{п.г.}}$ - 40-70 кг/м^3 , вміст води в газах < 0,005 г/м^3 , інтенсивність вдудання - 100-200 кг/хв. , вміст активуючої добавки в суміші - 5-10%.

Здійснення позапічної десульфурації при додержанні наведених і ряду інших відпрацьованих умов (в т.ч. фракційно-дисперсний склад порошку,

параметри роботи пневмодозуючої системи та інш.) дозволяє знижувати вміст сірки в чавуні аж до 0,005% при ступені десульфурації 85% і за-своєного вапна до 20%. Це знижує питому витрату вапна до 6-8 кг/т, що відповідно зменшує утрати температури чавуну при десульфурації до 20°C. Відпрацьована при наведених параметрах залежність Ст.D від q_{CaO} (мал.6) дозволяє достатньо надійно установлювати витрати вапна для заданої глибини десульфурації. В роботі показано, що відхилення від цих параметрів істотно знижує ефективність і економічність процесу десульфурації.

Попереднє введення в чавун (перед вдуванням вапна) алюмінію (0,5-0,9 кг/т) підвищує ступінь десульфурації на 5-10% (абсолютних) при од-ночасній стабілізації показників та глибини десульфурації чавуну.

За результатами промислових продувок підтверджені наступні поло-ження найбільш ефективної технології десульфурації чавуну ва-пновмістним реагентом - обробка чавуну в великих заливальних ковшах (більше 150 т), забезпечення оптимальної концентрації вапна в газі (40-70 кг/м³), використання вапна високої якості і з активуючими добавками, азо-ту (і природного газу) з виключно низьким вмістом вологи (не більше 0,005 г/м³), розробленої апаратурно-технологічної схеми і ряд інших. Ос-новні положення цієї технології були впроваджені (освоєні) на УДЧ конвер-терних цехів металургійних комбінатів "Криворіжсталь" і ДМК ім. Дзєр-жинського.



Мал.6. Залежність ступені десульфурації чавуну (Ст.D) від питомої витрати (q) вду-ваємого вапна (CaO), каль-цінованої соди (Na₂CO₃) та технічного карбїду кальцію (CaC₂).

При десульфурації чавуну кальцінованою содою показано, що вдуван-ня її через фурму, розширену на виході, і стабілізація подачі порошку дозво-лили забезпечити надійне введення соди в розплав при зниженні витрат га-зу-носія аж до 60 м³/г, і підвищенні інтенсивності вдування соди до 0,4-0,5 кг/хв. на тону чавуну при наповненні ковша металом біля 70-80% і

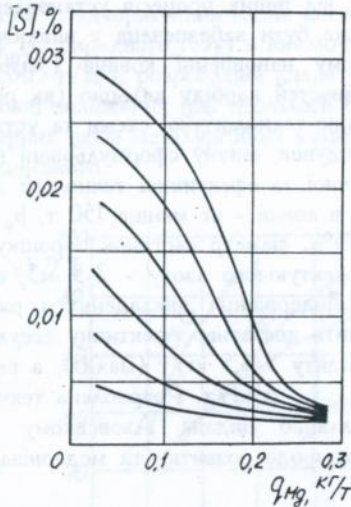
відсутності викидів чавуну. Це дозволило в 2,0-2,5 рази підвищити ступінь засвоєння соди, знизити витрати соди на видалену сірку (показник β) до 20-50 кг/кг, довести ступінь десульфурації до 80% й вище (мал.6) і знизити вміст сірки в чавуні до 0,005%. Разом з тим відмічена недостатня стабільність результатів та характерні значимі витрати температури (аж до 80°C). В роботі запропоновано здійснювати обробку чавуну содою у великих заливальних ковшах, що дозволяє підвищити ступінь засвоєння і знизити витрати соди і, таким чином, значно зменшити негативні фактори цього процесу.

Технологія десульфурації карбідом кальцію відпрацьована і перевірена при обробці чавуну в доменних ковшах. Показано, що при використанні реагенту у вигляді меленого технічного карбіду кальцію зі вмістом CaC_2 біля 63% досягається глибока (до 0,003% сірки) десульфурація чавуну. Забезпечення оптимальної концентрації порошку в газі (50 кг/м^3) підвищує ступінь засвоєння K_{CaC_2} до 30%. На відміну від інших процесів установлено, що продувка чавуну карбідом кальцію може бути забезпечена у виключно спокійному режимі при практично повному наповненні ковшів (95% і більше). Це є наслідком особливих властивостей карбіду кальцію (як реагента) і використання розробленої апаратурно-технологічної схеми та устаткування. За результатами промислових продувок чавуну сформульовані наступні оптимальні умови найбільш економічної та ефективної технології десульфурації карбідом кальцію: маса чавуну в ковші - не менше 150 т, $h_p > 2,5$ м, вміст CaC_2 в реагенті - не менше 75%, діаметр частинок порошку - 0,1-0,4 мм, $\eta_{\text{п.г.}} - 50 \text{ кг/м}^3$, витрати інжектуючого азоту - 2-3 м³/хв., інтенсивність вдування - 80-150 кг/хв. Додержання викладених і ряду інших розроблених умов дозволяє забезпечити достатньо ефективну десульфурацію (60-80%) чавуну при витраті реагенту 3-4,5 кг/т (мал.6), а глибоку десульфурацію (90% і більше) при $q_{\text{CaC}_2} - 6 \text{ кг/т}$. Розроблена технологія десульфурації чавуну карбідом кальцію видана Азовському та Липецькому Гіпромезам для проектних робіт щодо розвитку та модернізації засобів позапічної обробки чавуну.

Значний обсяг виконаних і поданих автором розробок пов'язаний з пошуком та створенням ефективного і економічного процесу десульфурації чавуну магнійвмістними реагентами. В цьому розділі наведені дані широкої промислової перевірки та розробки технології десульфурації чавуну з використанням різних магнієвих реагентів, параметрів і способів уведення. Параметри, показники та номограми уточнені тривалою перевіркою на УДЧ і ВДЧ різних заводів, яка виявила, що незалежно від переваг чи недоліків різних технологій введення магнію, рівень ефективності десульфурації чавуну виростає з більш повним використанням у технології вироблених нами наукових положень щодо забезпечення сприятливих умов розчиненості магнію в

чавуні та взаємодії з сіркою розплаву в ковші. З цих причин у послідовності варіантів 1-6 технологій (табл.) закономірно відбувається підвищення K^{S+Mg}_{Mg} з 30 до 95%, зниження β_{Mg} з 5,2 до 1,1 кг/кг та підвищення D_{Mg} з 6,1 до 36%, тобто оптимальною, та найбільш економічною є технологія десульфурації чавуну магнієм по варіанту 6 у великих залізничних ковшах, яка забезпечує найбільш високе засвоєння реагенту й мінімальні його витрати (табл., номограма, мал.7).

Промислова перевірка показала, що більш низькі значення K^{S+Mg}_{Mg} і необхідні в деякій мірі підвищені витрати магнію при обробці в доменних ковшах можуть компенсуватися (в бік поліпшення показників) корегуючою добавкою (1-3 кг/т чавуну) в ковш фракціонованого вапна (або його відходів), піддувом азоту під кришку ковша й застосуванням Mg-Al композицій.



Мал.7. Номограма потрібних витрат гранульованого магнію (q_{Mg}) для заданого зниження вмісту сірки $\Delta[S]$ в чавуні при десульфурації в залізничних ковшах (при $h_0 > 2,5$ м).

Вдування вторинного гранульованого магнію ($Mg_{\text{акт.}}$ - 82%, Al - 9%, Zn - 2,7%, хлор-йон - 4%) в рівних умовах обробки забезпечує більш високе K^{S+Mg}_{Mg} (на 10%), чим первинного магнію, що обумовлено більш сприятливими умовами розчиненості магнію в чавуні з уведенням алюмінію. Застосування наведених способів дозволило стабілізувати ступінь засвоєння магнію при обробці в доменних ковшах на рівні 94%.

Середні показники промислових серій десульфурації чавуну
вдуванням магнійвмістних реагентів

| № варіанту | Реагент, спосіб введення, тип газу-носія | Тип ковша з чавуном | Питома ступінь десульфурації, $D_{Mg}, \% / 0,1 \text{ кг Mg}$ | Витрати магнію на сірку, $\beta_{Mg}, \text{ кг/кг}$ | Ступінь засвоєння магнію, $K^{S+Mg}, \%$ |
|------------|---|---------------------|--|--|--|
| 1 | Суміш магнію з вапном (доломітом), фурма постійного діаметру, повітря | 140т доменний | 6,1 | 5,2 | 30,1 |
| 2 | Магній гранульований, фурма постійного діаметру, повітря (азот), більше 120 м ³ /г | 140т доменний | 8,9 | 3,9 | 45,0 |
| 3 | Магній гранульований, фурма з випарювачем, повітря (азот), 110-120 м ³ /г | 140т доменний | 10,3 | 2,9 | 58,2 |
| 4 | Магній гранульований, фурма з випарювачем, азот (повітря), 60-70 м ³ /г | 140т доменний | 14,2 | 2,0 | 66,6 |
| 5 | Магній гранульований, фурма з випарювачем, природний газ, 50-60 м ³ /г | 140т доменний | 25,4 | 1,6 | 85,0 |
| 6 | Магній гранульований, фурма з випарювачем, аргон (природний газ), 60 м ³ /г | 350т заливальний | 36,0 | 1,1 | 95,0 |

За результатами досліджень та промислової перевірки сформульовано перелік оптимальних параметрів і умов технологічного процесу десульфурації чавуну магнійвмістними реагентами. Основними складовими найбільш ефективного здійснення цього процесу є: попереднє випарювання магнію за рахунок вдування через занурювальну фурму з випарюючою камерою на виході; застосування як газу-носія природного газу або аргону; діаметр частинок магнію - не більше 1,5 мм; $h_{\phi} > 2,5 \text{ м}$; $\gamma_{\text{н.г.}}^{Mg} > 12 \text{ кг/м}^3$; корегуюча

добавка вапна в ковш; мінімальні витрати газу-носія ($20-40\text{ м}^3/\text{г}$); корегування газової атмосфери вдуванням азоту під кришку; обробка чавуну в заливальних ковшах (пріоритетно). Викладене та ряд інших параметрів забезпечують засвоєння магнію не нижче 90%, мінімальну питому витрату ($0,2-0,3\text{ кг/т}$) та найменші утрати температури ($5-10^\circ\text{C}$).

В обсязі виконаної роботи уточнені також закономірності зміни вмісту сірки в ковшах з чавуном на всіх операціях - від випуску з доменної печі до зливу в сталеплавильний агрегат, в т.ч. із використанням технології десульфурації чавуну різними реагентами. Сформульовано й перевірено на ряді заводів основні технологічні прийоми, які виключають розвиток процесів ресульфурації при вмісті сірки в знесірчуваному чавуні аж до 0,001-0,005%.

Розроблений комплекс технологічних процесів і апаратури засвоєно при промисловому виробництві гранульованого магнію (концерн "Оріана", м.Калуш, Україна), на установках і відділах десульфурації чавуну металургійних комбінатів "Азовсталь", ДМК ім.Дзержинського, "Запоріжсталь" та інш., а також за ліцензією на Раахеському металургійному заводі (Фінляндія). Проектна потужність створених засобів позапічної обробки на різних заводах складає $0,35-4,0\text{ млн.т}$ чавуну за рік. Максимальне сумарне річне виробництво знесіреного чавуну на цих об'єктах складало $7,15\text{ млн. т/рік}$. Вміст сірки в чавуні після десульфурації визначається по—требами споживача і вар'юється в межах від 0,003 до 0,015%. Основний обсяг знесіреного чавуну використовується для виплавки сталей з низьким вмістом сірки та особливо чистих від сірки сталей.

Проведені з компанією "Росборо" (США) спільні випробування розробленого процесу десульфурації чавуну вдуванням гранульованого магнію природним газом та аргоном через фурму з випарювачем підтвердили його надійність та високе засвоєння магнію - в $1,5-2,0$ рази вище, ніж у найближчого закордонного аналогу.

Техніко-економічне порівняння і аналіз виконаних розробок показав, що їх використання в процесах позапічного рафінування підвищило ступінь засвоєння магнію в середньому з 42,5 до 90%, вапна - з 7 до 15 %, карбїду кальцію - з 21,5 до 24,5%, кальцінованої соди - з 9,5 до 22%. За комплексом показників пріоритетними визначено і рекомендовано розроблені процеси десульфурації чавуну вдуванням гранульованого магнію і порошкової суміші вапна з содою у великих заливальних ковшах. Процес десульфурації чавуну гранульованим магнієм відрізняється від відомих аналогів найбільш високим (більш 90%) засвоєнням магнію, найменшими його витратами (біля 1 кг на 1 кг видаленої сірки) та надійною глибокою десульфурацією чавуну в широких промислових масштабах використання. Показники розробленої технології десульфурації чавуну сумішшю вапна з содою не по-

ступаються перед відомими аналогами й супроводжуються меншими (на 10-20%) витратами реагентів при забезпеченні зниження сірки в чавуні аж до 0,005%. За витратами створені процеси десульфурації чавуну вдуванням магнію через фурму з випарювачем в струмені нейтральних газів, зі вдуванням вапна з добавкою соди, визначені як найбільш економічні і ресурсозберігаючі. Їх подальша перспективність підсилюється за рахунок використання вторинного магнію (із лому та відходів) та високоякісного дешевого вапна власного виробу.

В и с н о в к и

1. Розроблені і розвинені теоретичні положення та наукові основи матеріало- і енергоекономних технологічних процесів позапічної десульфурації чавуну в ковшах на базі комплексного дослідження та аналізу закономірностей обмінних процесів у системі "метал-реагент-шлак-газова атмосфера". Створено і засвоєно промислові технології десульфурації чавуну, устаткування та апаратура для їх реалізації, що забезпечило виробництво високоякісної металопродукції з низьким та особливо низьким вмістом сірки, а також підвищило рівень ресурсозбереження процесів виплавки чавуну та сталі.

2. Досліджені закономірності термодинаміки процесів позапічної десульфурації чавуну різними реагентами. З єдиних методичних позицій визначено термодинамічні параметри та особливості комплексу реакцій між реагентами, компонентами чавуну і газовим середовищем щодо умов позапічного знесірчення в ковшах. Показано, що склад знесірчувальних реагентів раціонально компонувати на базі Mg, Ca, CaC₂, CaO, CaSi, Na₂O, Na₂CO₃ та композицій на їх основі, з яких віддається перевага Mg, CaC₂, CaO та Na₂CO₃. Для цих речовин сформульовано раціональні схеми реалізації обмінних процесів при позапічній обробці рідкого чавуну.

Із можливого складу речовин та реагентів для десульфурації чавуну найбільш ефективним визначено магній та сплави на його основі, що обумовлено в першу чергу реальною можливістю насичення рідкого чавуну магнієм у кількості аж до 1% і розвитком обмінних процесів з компонентами чавуну в об'ємі всієї оброблюємої ванни (не тільки в зоні введення та барботування). З позицій термодинаміки обґрунтовано пріоритетність введення магнію в рідкий чавун без пасивуючих добавок, із забезпеченням розчинення магнію в чавуні, в струмені природного газу чи аргону, при концентрації магнію в газі-носії більше 12 кг/м³, на можливо більшу глибину розплаву і при більш низькій температурі в зоні введення. Теоретично виявлено і показано переваги здійснення десульфурації в великих заливальних ковшах.

3. Розроблена методика розрахунково-теоретичного аналізу тепло- і масообмінних процесів, яка дозволяє оцінити процеси нагріву, плавлення, випарювання та спливання введених у рідкий чавун реагентів. На її основі одержано дані та розроблено номограми динаміки тепло- і масообмінних процесів для різних реагентів в залежності від їх дисперсного складу та глибини введення в розплав. Визначено оптимальні розміри частинок реагентів для позапічного рафінування чавуну та принципові положення процесів введення їх в розплав. Показано, що магній, на відміну від інших реагентів, при введенні в рідкий чавун (при позапічній обробці) повинен бути у вигляді пару. Цим науково обґрунтовано необхідність введення магнію в чавун через фурму з випарювачем на виході та підтверджено наше положення щодо раціональності застосування магнію без пасивуючих домішок.

4. Сформульовано основні положення реалізації найбільш раціонального механізму обмінних процесів між знесірчувальними реагентами і рідким чавуном в ковшах для нерозчинних та розчинних у розплаві речовин. Для перших пріоритетними параметрами оптимізації визначено: раціональну аерогідродинамічну ситуацію (співвідношення газ-твердий матеріал у струмені газу, що вдувається, швидкість витікання в розплав, діаметр частинок реагентів, інтенсивність вдування газу та інш.) в реакційній зоні та її хімічну активізацію (склад реагенту, діаметр частинок, активуючі добавки та інш.). Для розчинних реагентів (магнію та його сплавів) положення, які рекомендовані термодинамікою, поповнені введенням алюмінію в склад реагенту, а також регулюванням складу атмосфери і шлаку в ковшах, що сприяє більш повному насиченню чавуну магнієм, запобіганню окислення розчиненого в чавуні магнію та виключення розвитку процесів ресульфурзації. Розроблені нові теоретичні уявлення про механізм процесів десульфурзації чавуну магнієм, який вводять в розплав в струмені газів. Показано, що при певних параметрах інжектуюче середовище, сприяючи масообмінним процесам, не знижує ефект засвоєння магнію чавуном. У роботі наведено конкретні параметри та положення реалізації виконаних розрахунково-аналітичних робіт.

5. Виведено теоретичні рівняння, що описують закономірності змішування знесірчених чавунів з різним вмістом сірки з урахуванням способів їх одержання. Показано, що при десульфурзації немагнієвими реагентами змішування знесірчених чавунів з різним вмістом сірки підлягає законам звичайного усереднення. При змішуванні оброблених магнієм чавунів розчинених в розплаві магній бере участь в обмінних процесах і забезпечує продовження десульфурзації, що дозволяє знизити вміст сірки при змішуванні аж до 0,005%.

6. Теоретично вивчено та оцінено у порівняних умовах закономірності теплових режимів при десульфурзації чавуну різними реагентами в змінюваних умовах рафінування. За виведеними аналітичними виразами по-

будовано діаграми для визначення змін температури чавуну при десульфурації в залежності від первинних і кінцевих умов обробки чавуну в ковшах. Показано, що незалежно від способу десульфурації позапічна обробка супроводжується утратами тепла. Найбільш енергоекономним процесом є десульфурація гранульованим магнієм, який вдувають через фурму з випарювачем у струмені природного газу чи аргону. З огляду на великі утрати тепла при обробці карбонатами, вони не рекомендовані як знесірчувальні реагенти. Установлені оптимальні умови застосування магнію та вапна з мінімальними втратами температури чавуну, в т.ч. при глибокій його десульфурації.

7. Проведено широкомасштабні експериментальні дослідження і перевірку теоретичних положень роботи та уточнення закономірностей процесів десульфурації чавуну в ковшах різними реагентами при зміні: маси чавуну (від 0,25 до 280 т), типу ковшів (лабораторні, відкриті доменні, заливальні та міксерні), витрат реагенту (0,1-30 кг/т), типу газу-носія та його витрат, температури чавуну, глибини введення реагенту, складу та кількості шлаку в ковшах, початкового та кінцевого вмісту сірки в чавуні, складу газової атмосфери в ковшах та ряду інших параметрів обробки. Підтверджено виконані теоретичні наробки, уточнено та конкретизовано комплекс оптимальних параметрів позапічної десульфурації чавуну в ковшах інжектуванням реагентів, в т.ч. їх властивостей та складу. Одержані результати дозволили обґрунтувати пріоритетність здійснення десульфурації чавуну у великих ковшах з використанням магнію та вапна.

Основними принциповими положеннями оптимального процесу десульфурації чавуну магнійвмістним реагентом установлено:

- застосування магнію та його сплавів у диспергованому вигляді (гранули, зерна діаметром не більше 1,4 мм) без пасивуючих і збіднюючих добавок;

- забезпечення попереднього нагріву та випару магнію перед безпосереднім введенням в розплав;

- гарантоване керування і контроль інтенсивності введення та випару магнію інжектуванням через занурювальну фурму з випарювачем на виході при витратах газу-носія 30-40 м³/г;

- застосування нейтральних до магнію газів (природний, аргон) при концентрації магнію в газі більше 12 кг/м³;

- корегування складу газової атмосфери в ковші зі зниженням вмісту кисню нижче 10%;

- підвищення сульфідної ємкості ковшових шлаків корегуючою добавкою (коло 200 кг/т шлаку) фракціонованого (2-10 мм) вапна або відходів його виробництва;

- введення магнію в чавун на максимальну глибину при допустимо низькій температурі в зоні введення.

Основними положеннями найбільш економічного процесу десульфурації чавуну вапновмістним реагентом визначені:

- забезпечення концентрації порошку в інжектуючому газі 40-70 кг/м³ та швидкості витікання двофазного струменю в розплав 100 м/с і більше;
- занурювання фурми в розплав на глибину не менше 2,5 м, а маса оброблюваного чавуну в ковші не менше 150 т;
- застосування вапна з вмістом СаО_{акт.} не менше 92%;
- вдування вапна в чавун в суміші з кальцінованою содою (5-10%);
- застосування інжектуючих газів з вмістом вологи не більше 0,005 г/м³;
- введення активуючої добавки алюмінію в чавун перед десульфурацією.

Викладені та ряд інших параметрів склали основу промислових технологій десульфурації чавуну різними реагентами для ряду підприємств.

8. Для забезпечення оптимальних параметрів обробки чавуну вивчені закономірності дозування, пневмотранспортування та вдування диспергованих реагентів на експериментальних модулях, фізичних моделях і промислових установках десульфурації чавуну, оснащених для цього комплексом вимірювальної апаратури. Установлені взаємозв'язки характеру протікаючих процесів з умовами і параметрами дозування, пневмотранспортування та вдування реагентів в розплав дозволили виробити і створити технічні рішення практично по всьому апаратурному комплексу установок десульфурації. Значна частина цих розробок (підготовка реагенту, система дозування, матеріалопроводи, фурменні пристрої, підготовчі операції, режим роботи устаткування та інш.) створена за принципово новою схемою. Надійність їх роботи перевірена на вітчизняних та закордонних заводах.

9. Вивчені питання екології під час позапічної обробки чавуну, визначені параметри і характеристики пилегазових викидів із ковшів та утворених відходів при цих процесах. Визначені умови, які дозволяють за рахунок параметрів технології позапічної обробки знизити на порядок запиленість відходного диму, зменшити вдвоє кількість газів і в 3-4 рази зменшити втрати металу. Але показано, що в будь-якому випадку позапічна обробка чавуну потребує застосування пилоочисних споруджень. Очистка та нейтралізація газової фази відходящого диму не потребується. За результатами досліджень та аналізу вироблені рекомендації та основні вимоги щодо вилучення та утилізації відходів і викидів при позапічній десульфурації чавуну різними реагентами.

10. Розроблені та удосконалені технологічні процеси позапічної десульфурації чавуну в ковшах різними реагентами були перевірені, дороблені

та засвоєні на установках та у відділеннях десульфурації чавуну ряду металургійних комбінатів і заводів ("Азовсталь", ДМК ім. Дзержинського, "Запоріжсталь", Новолипецький, ім.Ілліча, Раахеський (Фінляндія), "Криворіжсталь" та інш.) Промислова перевірка показала, що реалізація технології у відповідності з розробленими науковими положеннями та рекомендованими режимами вдування підвищує ступінь засвоєння реагентів практично вдвоє: магнію - до 90-95%, вапна - до 9-20%, соди - до 7-37%, а карбіду кальцію - в середньому до 25%. Це дозволило практично кожним із цих реагентів забезпечити глибоку (до 0,005% сірки) десульфурацію чавуну. Відпрацьовані та перевірені у промислових умовах номограми залежності витрати реагенту, потрібного для заданого зниження вмісту сірки в чавуні.

Найбільш ефективними й економічними із розроблених визначені технологічні процеси обробки чавуну в заливальних ковшах вдуванням гранульованого магнію через фурму з випарювачем і вдуванням порошкової суміші вапна з содою. Порівняння показників засвоєння реагентів і десульфурації цих процесів перевищує відомі, в т.ч. і закордонні, аналоги. Економічна оцінка показує, що найменш витратним та найбільш економічним є розроблений нами процес десульфурації диспергованим магнієм, другим - продувка сумішшю вапна з содою, на третьому місці - закордонна технологія ("Россборо", Крупп Полізіус, "Хінклі", "Альмамет-Ремакор") вдування суміші зернистого магнію з вапном високої ($\text{CaO}_{\text{акт.}} > 93\%$) якості. Усі інші технології й способи десульфурації чавуну є істотно більш витратними та дорогими.

Із розроблених нами процесів десульфурації чавуну у ковшах засвоєні: вдування гранульованого магнію та порошкового вапна. Технологічні та технічні рішення, які одержали при використанні досліджень, видані також проектним організаціям у складі технологічних завдань і рекомендацій на реконструкцію та модернізацію металургійних комбінатів ("Азовсталь", "Запоріжсталь", "Криворіжсталь", ДМК ім.Дзержинського, Новолипецького та інш.).

Сумарний річний економічний ефект від впровадження розробок складає 19,587 млн.руб. (в цінах до 1990 р.) і 428 млрд.крб. (в цінах після 1990 р.) з долею автора відповідно 5,31 млн.руб. і 130,4 млрд.крб.

Основний зміст дисертації опубліковано:

1. Шевченко А.Ф. Механизм и кинетика процесса десульфурации жидкого металла в ковше вдуванием порошковой извести. // Применение

порошкообразных материалов в сталеплавильном процессе. Сб. труд.- М.:НИИИНФОРМТЯЖМАШ. - 1969.- С.41-47.

2. Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Ткач Н.Т., Зотов А.В., Ганошенко В.И. Внепечная обработка чугуна магнийсодержащими реагентами. // Сталь. - 1996.-№ 7. - С.17-19.

3. Шевченко А.Ф., Зигало И.Н., Двоскин Б.В., Вергун А.С., Костицын Е.А.Влияние типа и расхода реагента на теплотери чугуна при внепечной десульфурации. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия.- 1996.- № 3.- С. 4-7.

4. Шевченко А.Ф., Мальков А.Н., Кривошеев В.А., Лымарь Ю.А., Воронова Н.А. Изучение закономерностей вдувания гранулированного магния в жидкий чугун через фурмы погружения с различным профилем канала. // Металлургическая и горнорудная промышленность.-1982.№ 3(125).- С.11-12.

5. Barannik I.A., Shevchenko A.F., Riabukhin I.M., Granulated magnesium and practice of using it for molten metal treatment // IMA-51.- Berlin. Germany.- 1994. - P.82-90.

6. Шевченко А.Ф., Учитель Л.М., Зотов А.В., Двоскин Б.В., Ганошенко В.И., Днепренко Н.Н., Орман В.Я. Технологический комплекс внепечной десульфурации чугуна магнием и известьсодержащими реагентами. // Тр. III-го конгресса сталеплавильщиков. - М.:Черметинформация. - 1996. - С.222-224.

7. Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Костицын Е.А., Ткач Н.Т., Зотов А.В. Изменение температуры жидкого чугуна при десульфурации в ковше различными реагентами. // Сталь. - 1995. - № 8. - С.18-20.

8. Лафер И.М., Шевченко А.Ф., Мальков А.Н. Влияние остаточного магния в глубокообессеренном чугуне на содержание серы в расплаве при смешивании // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ. - Киев. - Наукова думка. 1995. С. 92-100.

9. Шевченко А.Ф. Анализ процесса десульфурации жидкого чугуна в ковше вдуванием порошковой извести в струе газа // Повышение качества чугуна и чугунного литья. Сб. тр. ИЧМ. - М.:Металлургия. - 1972. - С.50-55.

10. Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Гулыга Д.В. Теоретические и технологические аспекты десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния. // Тр. I-го конгресса сталеплавильщиков. - М.:Черметинформация. - 1993. - С.179-181.

11. Шевченко А.Ф., Десульфурация чугуна вдуванием порошковой извести под содовым шлаком // Технология и организация производства. - 1968. - № 2. - С.33-34.

12. Шевченко А.Ф., Вергун А.С., Рудницкий М.Л., Зигало И.Н. Повышение степени использования магния при внедоменной десульфурации чугуна. // Сталь. - 1989. - № 11. - С.44-46.

13. Шевченко А.Ф., Ткач Н.Т. Состояние и перспективы развития внепечной десульфурации чугуна на предприятиях черной металлургии. // Сб. тр. Наука, технология, производство. - М.:Металлургия. - 1989. - С.105-113.

14. Шевченко А.Ф., Лепорский С.В., Вяткин Ю.Ф., Лафер И.М., Двоскин Б.В. Выбор рациональной схемы организации внепечной десульфурации чугуна // Сталь. - 1988. - № 7. - С.20-22.

15. Шевченко А.Ф., Емельянов И.Я., Мальков А.Н., Лаврентьев М.Л., Баранник И.А., Плевако В.С. Техничко-экономическое сравнение способов рафинирования доменного чугуна в ковшах вдуванием магния // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1973. - № 6 (84). С. 71-73.

16. Бондаренко А.Г., Шевченко А.Ф., Лафер И.М., Лопатенко К.П., Мусиенко В.М. Условия работы канатного привода фурм при внепечной обработке чугуна // Сталь. - 1987. - № 7. - С.29-31.

17. Шевченко А.Ф., Ткач Н.Т., Курилова Л.П. Состояние и перспективы развития внедоменной десульфурации чугуна на металлургических предприятиях Украины // Внепечная обработка металлических расплавов, сб. тр., Киев. - Изд. АН УССР. - 1986. - С.11-18.

18. Днепренко Н.Н., Емельянов И.Я., Шевченко А.Ф. Исследование влияния наполнителя в магнийсодержащих смесях на эффективность внепечной десульфурации чугуна // Технология выплавки конвертерной и мартевской стали. Сб. тр. ИЧМ, М.: Металлургия - 1985 - С.67-70.

19. Воронова Н.А., Шевченко А.Ф., Ключник М.Н., Емельянов И.Я. Вопросы теории и практического применения гранулированного магния для обработки чугуна // Повышение качества чугуна и чугунного литья., Сб. тр.6 М.:Металлургия - 1971. - С.56-63.

20. Воронова Н.А., Шевченко А.Ф., Лафер И.М. Исследование закономерностей истечения газопорошковых струй из канала фурмы на установках по вдуванию порошковых реагентов в жидкий металл // Повышение качества чугуна и чугунного литья., Сб. тр. М.:Металлургия - 1972 - С.30-35.

21. Гулыга Д.В., Поживанов М.А., Семенченко П.М., Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Ткач Н.Т. Технологические преимущества десульфурации чугуна гранулированным магнием в заливочных ковшах сталеплавильных цехов // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1991. - №3. - С. 17-19.

22. Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Ткач Н.Т. Пути повышения эффективности использования магния при внедоменной десульфурации чугуна. //Магниевые сплавы для современной технологии. Сб. тр. 2-го всесоюзного совещ. по применению магниевых сплавов в нар. хоз-ве. - М.:Металлургия. - 1992. - С. 175-177.

23. Воронова Н.А., Шевченко А.Ф., Мальков А.Н. Повышение эффективности десульфурации чугуна гранулированным магнием путем изменения параметров инжектирования // Metallур. и горнорудн. пром-сть, - 1977 - № 3 - С.6-9.

24. Воронова Н.А., Привалов В.В., Шевченко А.Ф., Апретова Э.А., Лившиц Э.Я., Филиппов В.И., Мальков А.Н. Исследование загрязняющих атмосферу выбросов в процессе внедоменной десульфурации чугуна магнием на промышленной установке металлургического завода им. Ильича // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. Сб. тр. - М.: Металлургия - 1979 - № 5 - С.72-74.

25. Воронова Н.А., Шевченко А.Ф., Вергун А.С., Мальков А.Н. Расчетный метод регулирования расхода магния при глубокой десульфурации чугуна //Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. Сб. тр. М.: Металлургия - 1980 - С. 85-91.

26. Шевченко А.Ф., Кияшко А.Г. Известь как реагент для десульфурации металла // Процессы выплавки стали в конвертерах и мартеновских печах. Сб. тр. - М.: Металлургия - 1982 - С. 73-76.

27. Шевченко А.Ф., Кияшко А.Г., Мальков А.Н. Влияние фракционного состава извести на эффективность десульфурации чугуна // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. - 1984 - № 3 - С.25-27.

28. Вергун А.С., Лафер И.М., Шевченко А.Ф. К вопросу о механизме десульфурации чугуна магнием. //Сталь - 1985 - № 3. - С.17-19.

29. Шевченко А.Ф., Вяткин Ю.Ф., Лепорский С.В., Вихлевщук В.А., Ткач Н.Т. // Внепечная десульфурация чугуна на предприятиях черной металлургии // Сталь - 1985 - № 10 - С.32-34.

30. Емельянов И.Я., Шевченко А.Ф., Новиков В.Н., Шатунов В.К., Климашин П.С., Скурыгин Л.С. Десульфурация чугуна продувкой порошком технического карбида кальция в чугуновозных ковшах // Бюл. Черметинформации, 1985 - вып. 17(997) - С.51-53.

31. Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Гулыга Д.В., Пейтиев И.М., Климашин П.С., Емельянов И.Я., Мальков А.Н. Внедоменная десульфурация чугуна различными реагентами // Сталь - 1986 - № 2 - С.17-19.

32. Шевченко А.Ф., Ткач Н.Т., Двоскин Б.В., Гулыга Д.В., Поживанов М.А., Семенченко П.М. Опытно-промышленное опробование производства чугуна с супернизким содержанием серы для выплавки в конверте-

рах чистой по сере стали // *Металлургическая и горноруд. пром-сть*, 1991 - № 3 - С.7-9.

33. Шевченко А.Ф., Ткач Н.Т., Курилова Л.П. Состояние и перспективы применения магния для внедоменной обработки жидкого чугуна // *Магниево-сплавовые технологии для современной технологии*. Сб. тр. II-го Всесоюзного совещания по применению магниевых сплавов в народном хозяйстве. - М. - *Металлургия* - 1992 С.175-177.

34. Воронова Н.А., Плискановский С.Т., Шевченко А.Ф., Лаврентьев М.Л., Емельянов И.Я. Десульфурация чугуна вдуванием магния в чугуновозные ковши // *Сталь* - 1974 - № 4 - С.297-302.

35. Лаврентьев М.Л., Воронова Н.А., Шевченко А.Ф., Волков Ю.П., Зуев Б.П., Моисеев Ю.С., Певтиев И.М., Остапчук Н.П. Установка для внедоменной десульфурации чугуна // *Бюл. Черметинформации*. - 1974 - № 8 - С.35-36.

36. Поживанов М.А., Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В. Анализ эффективности обработки чугуна гранулированным магнием // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - 1993. - № 4 (170). - С. 13-19.

37. Плискановский С.Т., Воронова Н.А., Шевченко А.Ф., Хрущев Е.И., Вергун А.С., Певтиев И.М., Мальков А.Н., Герасимов В.А., Остапчук Н.П. Промышленное производство особо чистого по сере доменного чугуна // *Металлург* - 1980 - № 4 - С.19-21.

38. Бондаренко А.Г., Шевченко А.Ф., Остапчук Н.П., Мусиенко В.М. Совершенствование оборудования отделений десульфурации чугуна с погружными фурмами // *Металлург* - 1983 - № 3 - С.17-20.

39. Шевченко А.Ф., Тарановский В.В., Ткач Н.Т., Зубец В.И., Федоров Б.Г., Бердичевский В.Е. Исследование показателей глубокой десульфурации чугуна пассивированным магнием при выплавке конвертерной стали // *Металлургическая и горнорудная промышленность* - 1989 . - №2. - С.10-11.

40. Носоченко О.В., Баптизманский В.И., Иванов Е.И., Шевченко А.Ф., Двоскин Б.В., Лонский А.М., Поживанов М.А. Закономерности десульфурации чугуна гранулированным магнием // *Сталь* - 1993. - № 8. - С.25-29.

41. Двоскин Б.В., Шевченко А.Ф., Ткач Н.Т., Иванов Е.И., Лакунцов А.В., Ганошенко В.И. Опытнo-промышленное опробование технологии десульфурации чугуна в большегрузных заливочных ковшах инжестированием реагентов через погружаемую фурму // *Тр.1-го конгресса сталеплавильщиков*. - М.: Черметинформация - 1993 г - С.186-187.

42. Двоскин Б.В., Шевченко А.Ф., Ткач Н.Т., Иванов Е.А., Лакунцов А.В., Ганошенко В.И. Влияние температуры и давления в зоне ввода реагента на закономерности его усвоения при внепечной обработке чугуна

// Тр.ІІ-го конгресса сталеплавильщиков. -М.: Черметинформация. - 1994. - С. 201-203.

43. Шевченко А.Ф. Закономерности процесса управляемого ввода и усвоения магния расплавом при внепечной обработке чугуна // Изв. ВУ-Зов. Черная металлургия. - 1997. - № 8. - С.12-15

44. Шевченко А.Ф. Выбор оптимального процесса рафинирования жидкого чугуна реагентами на основе магния // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 1997. - № 4. - С.9-11.

Авторські свідоцтва №№

293855, 325267, 367154, 384406, 386567, 386571, 407491, 461571,
470184, 505682, 749900, 804692, 1106154, 1217885, 1294838, 1235222,
1339964, 1351091, 1380213, 1549079, 1592303

Патенти №№

798224 (Бельгія), 3880411 (США), 7405228-3 (Швеція),
2321495 (Германія), 7314868 (Франція), 494080 (Австралія),
812863(Бельгія), 881913 (США), 21350 (Іран), 878248 (Бельгія),
4417 (Нігерія), 149627 (Індія)

Підписано до друку 29.09.97р.

формат 60 x 84 / 16

Обл.-видавн.арк. I,96

Тираж ІІО Зак. № 650

Друк.база ІЧМ НАНУ, м. Дніпропетровськ,

пл.Стародубова, 1а

АНОТАЦІЯ

Шевченко А.П. Розробка і розвиток теорії і технології процесів позапічної десульфуратії чавуну в ковшах вдуванням диспергованих реагентів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 - металургія чорних металів. Державна металургійна академія України. Дніпроперовськ, 1997 р.

На основі комплексного дослідження й аналізу закономірностей обмінних процесів у системі "метал-реагент-шлак-газова атмосфера" розроблені основні теоретичні положення й технологічні параметри оптимальних варіантів процесів позапічної десульфуратії чавуну інжектуванням різних реагентів зі створенням найбільш матеріало- і енергоекономних рішень. Теоретичні положення базуються на дослідженнях термодинаміки, механізму, кінетики та комплексу тепло- і масообмінних процесів. Експериментальна перевірка й промислове відпрацювання технології здійснені на промислових ковшах. Процеси оптимізовані з використанням декількох реагентів. Найбільш ефективними і економічними, впровадженими на металургійних комбінатах, є процеси десульфуратії чавуну вдуванням гранульованого магнію через фурму з випарювачем на виході й інжектуванням вапновмістних сумішей при розроблених технологічних режимах.

Ключові слова: десульфуратія, чавун, інжектування, магній, вапно, карбід кальцію, кальцінована сода, газ-носіє, сірка.

Шевченко А.Ф. Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - металлургия черных металлов. Государственная металлургическая академия Украины. Днепропетровск, 1997 г.

На основе комплексного исследования и анализа закономерностей обменных процессов в системе "металл-реагент-шлак-газовая атмосфера" разработаны основные теоретические положения и технологические параметры оптимальных вариантов процессов внепечной десульфурации чугуна инжестированием различных реагентов с созданием наиболее

материало- и энергоэкономных решений. Теоретические положения базируются на исследованиях термодинамики, механизма, кинетики и комплекса тепло- и массообменных процессов. Экспериментальная проверка и промышленная отработка технологии осуществлены на промышленных ковшах. Процессы оптимизированы с использованием нескольких реагентов. Наиболее эффективными и экономичными, внедренными на металлургических комбинатах, явились процессы десульфурации чугуна вдуванием гранулированного магния через фурму с испарителем на выходе и инжектирование известьсодержащей смеси при разработанных технологических режимах.

Ключевые слова: десульфурация, чугун, инжектирование, магний, известь, карбид кальция, кальцинированная сода, газ-носитель, сера.

A.F.Shevchenko. Development and improvement of hot metal ladle desulphurization technology based on injection of powdered reagents. - Manuscript.

The Dissertation for defending the degree of Doctor of Technical Science on the speciality 05.16.02. - ferrous metallurgy. Ukraine State Metallurgical Academy, Dnepropetrovsk, Ukraine, 1997.

The complex investigations and analysis of the regularities of heat-material-mass-transfer processes within a system "Metal - Reagent- Slag-Gas atmosphere" have been performed and resulted in the development of theoretical foundations and optimal technological parameters of hot metal desulphurization processes based on injection of different reagents and on low-energy low-material solutions found. The theoretical solutions are based on investigation of thermodynamics, mechanisms, kinetics and complex of heat-mass-transfer processes. The experimental and industrial tests and trials of the technology proposed had been performed using full-scale industrial ladles. The optimization of the process had been based on several different reagents used. The most efficient technologies developed are in injecting pelletized magnesium through the lances ended with evaporator and injecting lime-containing mixture under technological schedules developed.

Keywords: desulphurization, hot metal, injection, magnesium, lime, calcium carbide, soda, carrier-gas, sulphur.

232114

AB 38.628