Державний заклад «Центральна державна науково-технічна бібліотека
гірничо-металургійного комплексу України»

МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ ТА ФЕРОСПЛАВІВ

Тематична добірка публікацій з актуальних
питань сталеплавильного виробництва

Випуск 4

Дніпро - 2025

Дана тематична добірка містить копії першоджерел, присвячених вирішенню актуальних теоретичних та практичних проблем, а також вдосконаленню технологій сталеплавильного та феросплавного виробництв.

Складено за фондом ЦДНТБ ГМК України станом на 01.06.2025 р.

Бібліографічний анотований список до тематичної добірки «Металургія сталі та феросплавів»

1. Конвертерне виробництво, безперервний розлив та позапічна обробка сталі

УДК 669.162.63
DOI: 10.34185/1991-7848.2022.01.17

Дослідження зміни вмісту сірки в чавуні і складу шлаку на технологічних переробах при подготовці чавуну до конвертерної плавки / А.П. Шевченко, В.Г. Кисляков, Б.В. Двоскін та ін. // Сучасні проблеми металургії. – 2022. – №25. – С.201-219.

У статті проаналізовано зміну вмісту сірки в чавуні та складу шлаку в технологічному ланцюзі підготовці чавуну до конвертерної плавки. На підставі результатів проведених досліджень розроблено та рекомендовано технічні рішення та технологічні прийоми, спрямовані на виключення ресульфурації чавуну. Точкове зондове сканування зразків ковшового шлаку показало, що в шлаковій фазі поряд із системами типу $CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}Al_2O_3$ з різним співвідношенням компонентів, що містять 0,2–3,5 % сірки, виявлені системи типу CaxSiyAlz, що містять до 1 % сірки; у «корольках» вміст сірки коливається не більш 0,1 – 0,85 % і у вигляді сульфідів типу (Fe, Mn)S, переважно MnS, причому у неметалевих включеннях «корольків» виявлено вміст сірки не більш 15–30 %. Проведені дослідження складів сухих, розсипчастих і рідких склоподібних ковшових шлаків після десульфурації показали, що вони не змінюють фазовий склад, але на відміну від вихідних ковшових шлаків у шлаковій фазі таких шлаків переважно присутні системи типу $CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}Al_2O_3{\cdot}MgO$, збагачені оксидами магнію з перемінним співвідношенням компонентів. При цьому сірка у шлаковій фазі сухих шлаків знаходиться в основному у вигляді комплексів (Ca, Mn, Mg, Al, Si)S, а у шлаковій фазі рідких шлаків в основному у вигляді MnS і рідше у вигляді комплексів (Ca, Mn)S. За результатами проведених промислових експериментів на низці підприємств України та Китаю було встановлено, що для обмеження приходу сірки до конвертерної сталі зі шлаком на рівні ≤0,002 %, залишок ковшового шлаку після десульфурації не повинен перевищувати 0,5 – 0,7 кг/т чавуну.

Ключові слова: позапічна десульфурація чавуну, шлак, сірка, ресульфурація……..……....……..**С.9**

УДК 621.746.58 + 669.33
DOI: 10.15407/plit2023.04.015

Бєлов Б.Ф. Аналіз структурно-хімічного стану дуплекс-систем силікати-силіциди лужно-земельніх металів. Повідомлення 4. Механізм рафінування доменного чавуну магнієм

та його сплавами./ Б.Ф. Бєлов, А.І. Троцан, О.В. Власова // Процеси лиття. – 2023. – № 4(154). – С. 15-27.

Виконано стохастичний аналіз структурно-хімічних реакцій розкислення та десульфурації доменного чавуну порошковими дротами, що містять магній і його сплави: силікомагнійкальцій (СМгК), феросилікомагній (ФСМг), а також магній + ставроліт і сплави феросилікокальцію (ФСК). Складено матеріальний баланс структурно-хімічних реакцій, побудовано полігональні осередки СІМ-комплексів оксисульфідних неметалевих включень, що утворюються; розраховано технологічні параметри ковшової обробки чавуну. Досліджено розподіл елементів у процесах рафінування чавуну сплавами магнію: елементами-розкислювачами є кремній та магній, десульфуратор — магній у сплавах ФСМг; у сплавах СМгК — розкислювачі кремній, магній, кальцій, десульфуратор — кальцій; у сплавах феросилікокальцію розкислювачі кремній та кальцій, десульфуратор — кальцій. При використанні спільно сплавів ФСК + ФК40 розкислювачами є кремній та магній, десульфуратори — магній та кальцій. Наведено порівняльний аналіз ефективності використання наповнювачів для порошкових дротів при витраті сплавів у кількості 1,0 кг/т. Встановлено, що раціональною технологією рафінування, випробуваною в промислових умовах в чавуновозних ківшах, є комплексна обробка активованими плавильними шлаками та порошковими дротами з наповнювачем ФС15Мг10+ФК40, для якого А0=22,2 % і АS=26,7 %. При цьому спостерігається як зниження витрат десульфуруючих матеріалів, так і підвищення ефективності рафінування доменного чавуну.

Ключові слова: структурно-хімічні реакції, адсорбційна ємність, плавильні шлаки, магній, механізм і технологія рафінування чавуну, порошкові дроти……...**С.28**

УДК 669.18.046.517-982
DOI: 10.52150/2522-9117-2023-37-220-230

Молчанов Л.С. Доцільність освоєння технології вакуумування сталі на ПРАТ «Каметсталь» / Л.С. Молчанов, В.П. Піптюк, С.В. Греков // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2023. – Вип. 37. – С. 220-230.

Робота присвячена розгляду доцільності освоєння в конверторному цеху ПрАТ «Каметсталь» (ДМК) технології вакуумної дегазації сталі вуглецевого та флокеночутливого марочного сортаменту на сучасному обладнанні відповідного призначення з метою зменшення вмісту газів та неметалевих включень в металопродукції. Вакуумування рідкого металу поза сталеплавильним агрегатом відкрило принципово нові можливості для значного підвищення всього комплексу фізико-механічних властивостей сталі різного призначення та ефективності металургійного виробництва. Прояв значного інтересу до цього процесу у ХХ столітті було викликано тим, що він відкрив нові, більш удосконалені технологічні можливості в здійсненні глибокого розкислення, зневуглецювання, легування та дегазації, що забезпечило значне підвищення якості сталі, що виплавляється. Важливою особливістю процесу вакуумної дегазації є можливість здійснення при незначному вакуумі (0,5-5,0 мм рт. ст.) доволі глибокого розкислення металу вуглецем, що міститься в ньому, при якому одночасно видаляються розчинені гази. Це дозволяє відмовитися від вживання в якості розкислювачів марганцю, кремнію, а в деяких випадках алюмінію і вирішити таким чином найбільш складну проблему сталеплавильного виробництва – отримання чистої сталі по вмісту неметалевих включень і газів. На вітчизняних металургійних та машинобудівних підприємствах за допомогою установок

вакуумної дегазації камерного типу (VD) освоєно виробництво сталі різного марочного сортаменту. Також експлуатується одна установка дегазації циркуляційного типу (RH) у м. Суми. На сучасних закордонних металургійних і машинобудівних підприємствах знайшли ефективне застосування установки вакуумної дегазації RH, DH (порційного типу) і VD типів. Причому в останнє десятиліття значно поширилося використання RH способу, особливо в металургійній галузі Європейських країн, США та Японії. Теперішня робота присвячена розгляду важливого для ДМК питання –визначенню способів вакуумної дегазації сталі, прийнятних для умов підприємства з урахуванням особливостей марочного сортаменту сталі, що виробляється зараз і на найближчу перспективу.

Ключові слова: вакуумна дегазація сталі, спосіб, обладнання, параметри якості металу.....**С.41**

УДК 669.224.5
DOI: 10.15407/steelcast2024.03-04.002

Комплексна система відсікання конвертерного шлаку з використанням розроблених функціональних виробів ТОВ «ГІР-Інжиніринг» / О.М. Смірнов, Л.В. Камкіна, К.М. Шарандін, Д.М. Рябий // Метал та лиття України. – 2024. – №3-4. – С.17-24.

Серед найважливіших завдань, які потребують вирішення в умовах сучасного конвертерного цеху, є скорочення кількості кінцевого технологічного шлаку, що потрапляє до сталерозливного ковша при випуску плавки з агрегату.

За оцінками різних дослідників і практичного досвіду, кількість шлаку, яка потрапляє в ківш при випуску сталі з конвертора, розподіляється наступним чином (без використання технології / пристроїв відсікання шлаку): до 25% – на початку випуску плавки, до 60% – в кінці випуску плавки і до 15% – при поверненні конвертора до робочого положення.

Нині існують дві принципові схеми відсікання конвертерного шлаку: автоматична (активна) та «пасивна». До основних автоматичних схем відноситься газодинамічна система відсікання та система типу «шиберний затвор». Доступною й ефективною альтернативою є схема «пасивного» відсічення первинного та вторинного конвертерного шлаку з використанням функціональних вогнетривких виробів.

На промисловому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжінірінг», спільно з ФТІМС НАН України, розроблено «пасивну» схему комплексного відсічення конвертерного шлаку. Вона містить дві системи: первинне відсікання пластичним стопором типу «тампон» і вторинне відсікання вогнетривким стопором типу «куля» / «дротик». Обидві системи працюють із ручними аплікаторами, що мінімізує капітальні витрати на їх упровадження у виробничий ланцюг. У період 2021–2024 рр. в умовах комбінату ПрАТ «КаметСталь» (конвертера ємністю 250 тн – 2 шт.) проведено успішні промислові випробування розробленої комплексної системи відсічення конвертерного шлаку.

Сумарний економічний ефект від впровадження становив ≈ 1,2 USD/т сталі.

Ключові слова: конвертер, шлак, первинне відсікання, вторинне відсікання, стопор, аплікатор……...……..……..**С.52**

УДК 669.162
DOI: 10.31319/2519-2884.46.2025.1

Випаровування та розчинення магнію в рухомих бульбашках / В.І. Єлисєєв, І.О. Маначин, Кисляков В.Г. та ін. // Збірник наукових праць ДДТУ. – 2025. – №1(46). – С.9-18.

У роботі наводяться результати дослідження кінетики процесу десульфурації за участю частинок магнію. Виконано математичний опис руху бульбашки з урахуванням її радіусу,коефіцієнту поверхневого натягу, густини рідкого металу, густини газу, гідравлічного тиску та умов масопереносу в розплаві. Наведено результати розрахунків для варіантів, де показані криві підйому бульбашок із частинкою магнію радіусом 1 мм. З'ясовано, що процес випаровування залежить від концентрації магнію в глибині металу. Виконано оцінку маси пари в бульбашці та зміни радіуса бульбашки під час підйому. Показано, що швидке випаровування магнію призводить до збільшення радіусів бульбашок, які спливають, та їхнє швидке схлопування пов'язане з розчиненням парів у рідкому металі. Представлена кінетична модель показує фізико-хімічний перебіг процесу надходження магнію з бульбашок у розплавлений метал під час обробки чавуну зернистим магнієм. Отримані результати розрахунків мають практичну цінність при освоєнні технології в промислових умовах.

Ключові слова: рафінування чавуну, магній, бульбашка, кінетика, модель……...…….……..**С.60**

2. Електрометалургія сплавів заліза

УДК 669.15
DOI: 10.48081/KNZZ6329

Аналіз термодінамічних розрахунків виплавки кремній-алюміній- хромового феросплаву, виконанних з використанням програмуванного комплексу «Терра» / Е. Ж. Шабанов, Д. Р. Мздибаєв, А. С. Байсанов та ін. // Наука та техника Казахстану. – 2022. – №1. – С.81-90.- Текст рос.

У статті наведено результати термодинамічних досліджень виплавки кремній-алюміній-хромового феросплаву із застосуванням програмного комплексу «ТЕРРА» (ПК «Терра»). В основі програмного комплексу «TERRA» використано метод повного термодинамічного моделювання (ПТМ) металургійних процесів.

Процес виплавки комплексного сплаву алюмосилікохрому (ФАСГ – залізо, алюміній, кремній, хром) є одностадійним та безшлаковим, який полягає у повному відновленні оксидів мінеральної частини вугілля. Зола вугілля, що складається переважно з кремнезему (до 55-60%) та глинозему (до 30-33%) була джерелом кремнію та алюмінію в сплаві.

В результаті досліджень були встановлені основні існуючі конденсовані та газові фази ($CaSiO_3$, C, SiO_2, Cr_3C_2, Al_2SiO_5, Pe_3C, SiC, Cr_5Si_3, Al_2O_3, CrSi, $CaAlO_4$, $CrSi_2$, CO, Cr, Si, Al, Fe). За допомогою комплексної програми «ТЕРРА» було визначено склади металевої, шлакової та газової фази та підтверджено їх температурні зміни.

Таким чином, за допомогою ПК «Терра» авторами було вивчено утворення, перехід та видалення різних фаз, які в сумі складає склад отриманого металу з досліджуваних матеріалів. Дані дослідження також можуть бути джерелом для визначення температури відновлення і плавлення металу при виплавці різних марок феросплавів.

Ключові слова: термодинамічний аналіз, конденсовані фази, газові фази, термодинамічне моделювання, алюмосилікохром, високозольне вугілля, програмний комплекс, термодинамічне дослідження……..…….. **С.70**

УДК 669.15-198
DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_96

Розробка технології виплавки комплексногоборовмісного алюмокремнієвого феросплаву / А.А. Акбердин, О.С. Кім, О.С. Орлов, Р.Б. Султангазіїв // Праці Карагандинського технічного університету. – 2023. – №3. – С.96-102.- Текст рос.

У рамках цієї роботи виконано розрахунково-теоретичне обґрунтування пічної технології виробництва металу. Новизною є побудова відсутньої у літературі діаграми фазового складу 4-компонентної металевої системи Fe-Si-Al-B та створення її математичної моделі. Встановлено, що при температурах випуску феросплаву з печі діаграма складається з трьох бінарних та семи потрійних сполук. Визначено оптимальну для виплавки проектованого феросплаву область. Проведено лабораторні досліди з отримання комплексних боровмісних сплавів у печі Таммана та індукційної печі. Доведено можливість практичного виробництва алюмо-кремнієвого феросплаву, що містить бор, з використанням вугілля родовища Куу-Чек і Борли.

Ключові слова: термодинамічне моделювання, комплексний боровмісний сплав, боратова руда, високозольне вугілля, карботермічний процес, одностадійна технологія, безшлаковий процес……..…….…….. **С.80**

УДК 669.15
DOI: 10.51301/ejsu.2023.i5.02

Комп'ютерне термодинамічне моделювання та експериментальне отримання феросплавів із суміші кеків вилуговування окислених мідних руд / А.М. Нурпеисова, В.М. Шевко, Д.К. Айткулов, А.А. Жолдасов // Engineering Journal of Satbayev University. – 2023. – №5. – С.11-17.- Текст рос.

У статті наводяться результати досліджень комп'ютерного термодинамічного моделювання та експериментів з отримання феросплавів із суміші кеків сірчанокислотного вилуговування кислих мідних руд родовищ Алмали, Аяк-Коджан, Актогай, Коунрад, Шатирколь, що містить (%): 65,2SiO_2; 14,2Al_2O_3; 7,4Fe_2O_3; 2,4K_2O; 2,7Na_2O; 6,6CaO; 2,8MgO; 0,2CuO. Моделювання проводилося з використанням програмного комплексу HSC-6.0, заснованого на принципі мінімуму енергії Гіббса, а також методу планування досліджень з використанням рототабельного плану другого порядку (план Бокса-Хантера). Визначався вплив температури і кількості вуглецю на рівноважний ступінь розподілу кремнію, алюмінію і концентрацію цих металів у сплаві. Експерименти з плавлення суміші кеків проводили в печі Тамма в ізотермічному режимі. На підставі отриманих результатів встановлено, що рівноважна взаємодія суміші кеків кучного вилуговування мідних руд з вуглецем і залізом відбувається з утворенням FeSi, $FeSi_2$, $FeSi_{2.33}$, Fe_5Si_3, $FeSi_{2.43}$, Fe_3Si, Si, SiO_2, Al, SiC, $CaSiO_3$, Al_2SiO_5, $MgSiO_3$, K_2SiO_3, Na_2SiO_3, Cu, CO. Збільшення заліза від 30 до 50% від маси суміші кеків вилуговування і температури від 1600 до 2000єС підвищує ступенем вилучення в сплав кремнію до 83.2%, і зменшує концентрацію кремнію в ньому від 40-41.41% (при 1800єС) до

30-31%, алюмінію при 2100єС від 8,3% до 5,5%. Ферросиліцій марки $FeSi_{45}$ з вилученням в нього 74-81,9% Si утворюється при 1780-1910єС, 30% заліза і 34% вуглецю, а марки $FeSi_{25}$ з вилученням в нього 70-76% утворюється в температурній області 1660-1730єС в присутності 43,5-50% заліза. Для досягнення високого (≥80%) кремнію в сплаві необхідна температура не менше 1800єС і 80-хвилинна тривалість процесу.

Ключові слова: окислені мідні руди, кеки вилуговування, термодинамічне моделювання, рототабельне планування, електроплавка, феросиліцій…...…….. **С.87**

УДК 669.786.365.001.2
DOI: 10.37434/sem2024.02.03

Моделювання електродугового режиму електропечі і аналіз її функціонування у реальному часі / М.М. Гасик // Сучасна електрометалургія. – 2024. – №2. – С.20-24.

Розглянуто модель трифазної електропечі, для якої розраховано об'ємний розподіл температури та електричного поля. Показано зони печі, в яких виникають екстремальні значення щільності струму і температури. Проведено порівняння результатів моделювання із реальними даними роботи печі потужністю 12 МВа у заводських умовах та обмірковано особливості функціонування печі при різних режимах.

Ключові слова: моделювання, піч, електричний режим, розподіл температури, щільність струму…….……...……...……..**С.94**

УДК 669.24:546.74:541.124:546.26
DOI: 10.15587/1729-4061.2025.324608

Очищення феронікелю методами електролізу та осадження для виробництва високочистого нікелю / А. З. Сяхріал, В. Астіні, Дж. Вахюаді // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2025. – Том 3, № 6. – С. 46-53. - Текст англ.

Це дослідження досліджує очищення феронікелю за допомогою електролізу та процесів осадження для отримання високочистого нікелю. Феронікель ще не знайшов широкого застосування в галузях промисловості, що потребують високочистого нікелю. Тому вкрай важливо розробити технології, які можуть покращувати якість феронікелю за допомогою електролітичних процесів. Феронікель, що складається приблизно з 18% Ni та 80% Fe, являє собою рясний, але недостатньо використаний ресурс для отримання високоякісного нікелю. Електроліз проводили з використанням феронікелевих анодів та графітових катодів у 2 M HCl з подальшим окисленням H2O2 та осадженням NaOH за різних умов pH (4,4 та 4,7) та температури (40–70°C). Результати показали, що концентрація Ni лінійно зростала від 5,36 г/л до 32,57 г/л протягом 8 годин електролізу, тоді як концентрація Fe швидко зростала та стабілізувалася приблизно на рівні 84,8 г/л через 3 години. Рентгенівський дифрактограмний аналіз виявив покращену кристалічність при вищих температурах, переважно утворюючи фази FeO2 та NiO при 70°C. Рентгенофлуоресцентний аналіз підтвердив ефективне видалення заліза, досягнувши 78,91% осадження Fe при pH 4,4 та 70°C, тоді як відновлення нікелю було максимальним при 14,60% при pH 4,7 та 70°C, але цей pH не є сприятливим через втрату Ni. CEM-сканування показало дрібнішу, більш однорідну морфологію осаду при підвищених температурах. CEM-візуалізація показала, що при pH 4,4 осад, що утворився при 40°C, мав грубу, пухко упаковану структуру з великими, нерівномірними частинками (середній розмір ≈6,50 мкм). Натомість, при 70°C осад був набагато дрібнішим та одноріднішим, з частинками ~916,8 нм. Результати дослідження підкреслюють, що електроліз з подальшим оптимізованим

осадженням дозволяє ефективно відокремити нікель від заліза, пропонуючи перспективний альтернативний шлях для модернізації феронікелю без використання процесів HPAL або матових процесів. Цей підхід сприяє диверсифікації ланцюгів постачання нікелю та просуванню сталого використання сировини з використанням місцевого вмісту.

Ключові слова: феронікель, вторинний, ресурси, місцевий, вміст, електроліз, осадження, pH, температура, час……..……..**С.99**