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

МЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ ТА ФЕРОСПЛАВІВ

Тематична добірка публікацій з актуальних
питань сталеплавильного виробництва

Випуск 1

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 01.02.2025 р.

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

1. Конвертерне виробництво, безперервний розлив та позапічна обробка сталі

УДК 621.74.047
DOI: 10.15407/scine17.04.019

Розробка двокамерного МГД проміжного ковша для розливання металів / О.М. Смірнов, А.В. Нарівський, Є.М. Смірнов та ін. // Science and Innovation – 2021. – №4. – С.19-24.- Текст англ.

Вступ. Прототипом багатофункціонального магнітодинамічного проміжного ковша (МД-ПК) є перший у світі магнітодинамічний міксер-дозатор для сталі місткістю до 10 т розплаву та електричною потужністю індукторів 600 кВт. Двокамерний МД-ПК було успішно впроваджено у промисловість. Подальші дослідження спрямовано на адаптацію цього пристрою для безперервного лиття сталі, зокрема на отримання напівперервних литих заготовок на металургійних мікрозаводах.

Проблематика. Вивчення впливу електромагнітного поля на перемішування розплаву та видалення неметалічних включень у прийомній камері МД-ПК на сьогодні є актуальним завданням.

Мета. Обгрунтування та створення МД-ПК для роботи в умовах металургійних мікрозаводів, як двокамерного агрегату, що додатково оснащено кількома електромагнітними та магнітодинамічними (МГД) пристроями.

Матеріали й методи. Вивчення процесу перемішування рідких металів під дією електромагнітного поля та видалення неметалевих домішок реалізовано за допомогою фізичного моделювання.

Результати. Вивчено поведінку струменя моделюючої рідини, що потрапляє зі сталерозливного ковша в центрифужну камеру. Оцінено вплив раціонального рівня рідини в центрифужній камері, що піддається прямій дії електро-магнітного поля. Встановлено, що ефект обертання загального об'єму рідини досягається вже на висоті застосування електромагнітного поля, що дорівнює 0,2—0,3 від загального рівня заповнення. Збільшення висоти накладення магнітного поля призводить до захоплення верхніх шарів моделюючої рідини.

Висновки. Запропоновано нову конструкцію магнітодинамічного проміжного ковша (МД-ПК) для безперервного розливання сталі. Застосування МД-ПК з обертовим рухом потоку може значно зменшити кількість великих оксидних включень у сталі (більше 10 мкм). Пристрій було успішно апробовано, а його застосування дозволить покращити якість литих

злитків, розширити функціональність обладнання та технологій, реалізувати сучасні високоефективні процеси безперервного лиття.

Ключові слова: безперервне лиття, електромагнітне перемішування та розливання, магнітодинамічний проміжний ківш, неметалеві включення, фізична модель…...……..**С.10**

УДК 669.162

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.3

Термодинамічний аналіз технологічної операції рафінування чавуну сумішшю оксидних компонентів системи CaO-FeO-Na2CO3 / М.В. Пушкаренко, В.Г. Кисляков, Л.С. Молчанов // Збірник наукових праць ДДТУ. – 2022. – №2. – С.26-35.

Метою роботи є уточнення особливостей фізико-хімічних перетворень, що протікають в об'ємі рідкого чавуну при інжектуванні рафінуючої суміші системи CaO-FeO-Na2CO3 при подачі в струмені газу-носія. Встановлені можливості та черговості протікання певних хімічних перетворень під час комплексного рафінування чавуну шляхом введення суміші оксидних складових, при використанні різних газів для інжектування, за допомогою методу термодинамічного аналізу, який базувався на оцінці величини показника Кр (константи рівноваги). Узагальнено інформацію стосовно взаємодії компонентів розплаву з продуктами окислення, що утворилися в зоні дії газового струменя, була побудована залежність lgKp від температури для можливих реакцій хімічних перетворень. Проведено термодинамічний аналіз процесу рафінування за рахунок інжекції рафінуючої суміші системи CaO-FeO-Na2CO3 при використанні різних газів-носіїв. Встановлено, що процеси видалення кремнію переважно протікають у зоні безпосереднього впливу газопорошкового струменя на розплав, а утворений при цьому діоксин кремнію ефективно зв'язується у двокальцієвий силікат. Видалення сірки з розплаву протікає безпосередньо за рахунок взаємодії елементів розплаву з продуктами, що утворилися в зоні впливу газопорошкового струменя на рідкий чавун і базуються на десульфурації содою у присутності високих концентрацій соди у розплаві.

Ключові слова: комплексна обробка; домішки; сірка; кремній; термодінамічний аналіз……..**С.16**

УДК 669.184.142

Моделювання впливу режиму продування ванни на масообмінні процеси та шлакоутворення у кисневому конвертер / Л.В. Камкіна, А.П. Мішалкін, В.Ю. Камкін та ін. // Теорія і практика металургії. – 2022. – №1. – С.36-47.

Мета. Встановити раціональні режими продування ванни та шлакоутворення при використанні традиційних та дослідних матеріалів, які забезпечують ефективне рафінування сталі від шкідливих домішок. Дослідити вплив зміни гідродинамічного стану конвертерної ванни на стійкість футерування проблемних зон конвертера та втрати металу з виносом, викидами, з корольками металу, що зливаються зі шлаком.

Методика. В роботі використано методи холодного та високотемпературного моделювання процесу виплавки сталі. При проведенні експериментів з холодного моделювання дотримувалися режиму проникнення в рідину струменів газу на зразку і моделі з забезпеченням Lрз/Нв (модель) = Lрз/Нв (конвертер). Нв – глибина ванни на моделі та діючому конвертері. Lрз – довжина реакційної зони при високотемпературному моделюванні

визначалась як довжина первинної реакційної зони, а при холодному – як довжина струменевої ділянки, що утворюється при проникненні газового струменю в рідину. Ці умови разом з забезпеченням подібності геометрії моделі та зразка вважали необхідними та достатніми для отримання даних для якісної та кількісної оцінки як гідродинамічного стану конвертерної ванни, так і впливу зміни способу та параметрів продування ванни на фізико-хімічні особливості рафінування сталі за часом процесу. Додатковою умовою, є дотримання умови рівності відношення площини ванни до площини внутрішнього перерізу сопла продувної фурми: (Sванни/Sсопла)модель=(Sванни/Sсопла)зразок на моделі та зразку.

Наукова новизна. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджена доцільність використання для встановлення впливу на фізико-хімічні процеси та перетворення в конвертерній ванні режиму продування, для характеристики якого вибрали параметр - гідродинамічний фактор, що дорівнює співвідношенню LрзI/Нв. В свою чергу, довжина реакційної зони, що утримується при проникненні газового струменю в ванну залежить від інтенсивності продування: Lрз ~ K q0,4. Вперше для визначення під час продування киснем залізовуглецевого розплаву конвертерної ванни інтенсивності переводу сірки в шлак для діапазону зміни вмісту в ньому вуглецю 3,0...0,25 використано параметр, що визначає стан перемішування ванни під час її продування киснем - LрзI/Нв, де LрзI – довжина первинної реакційної зони, яка утворюється при проникненні кисневого струменю в металевий розплав. Первинна реакційна зона є джерелом утворення пузирів СО за реакцією FeO + C = Fe +CO, які відповідають за інтенсивність перемішування ванни шляхом утворення циркуляційних потоків металу в ванні, які в свою чергу відповідають за транспорт елементів-домішок до межі метал-шлак.

Показано, що в заданому діапазоні зміни вмісту в металевому розплаві вуглецю залежність швидкості видалення з металу в шлак сірки від гідродинамічного параметру LрзI/Нв носить екстремальний характер. В цей час, коли досягається максимальний ефект перемішування ванни, при наявності необхідної основності шлакової фази швидкість реакції десульфурації для даних умов є максимальною. В подальшому в разі реалізації традиційної схеми конвертування, для якої характерно різке підвищення вмісту в шлаку оксидів заліза (15...17%) швидкість реакції десульфурації ще при достатній швидкості металевих потоків зменшувалася.

Практична значимість. Зниження інтенсивності продування металевої ванни в умовах реалізації виплавки сталі в лабораторному кисневому конвертері з верхнім кисневим продуванням з 4,0 м3/т·хв до 3,2 м3/т·хв, при збільшенні часу продування на 17,8%, підвищило показник десульфурації. Доведення реакції десульфурації до її більш повного завершення досягнуто за рахунок раціональної організації перемішування розплаву в конвертерній ванні: відповідна та ефективна з точки зору завершення десульфурації сталі швидкість доставки металу до реакційної поверхні забезпечила вищу у порівнянні з більш високо інтенсивним продуванням ванни киснем швидкістю реакції десульфурації на межі розподілу метал-шлак. При цьому значення показника Ls =(S)/[S] підвищилось з 6,4 до 10,5.

Ключові слова: сталь, конвертер, перемішування ванни, режими продування, гідродинамічний фактор, десульфурація, шлакоутворюючі суміші, відходи…….. **С.26**

УДК 669.16:669.785:669.02
DOI: 10.52150/2522-9117-2023-37-184-200

Аналіз моделей процесів позаагрегатного оброблення чавуну / В. Г. Кисляков, Д. М. Тогобицька, Л. С. Молчанов та ін. // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2023. – Вип. 37. – С. 184-200.

Метою роботи є виконання узагальнюючого аналізу досліджень щодо моделювання процесів позапічної обробки чавуну. Математичні моделі класифіковані відповідно до основних принципів моделювання. Приведено опис різних моделей, які будуються на різних засадах в залежності від їх типу та відмінності між ними. Проведено більш детальний аналіз деяких фундаментальних моделей та виразів, які були отримані при їх побудові. Наведено приклад моделей, що побудовані по експериментальним даним. Моделі нейронних мереж складаються зі штучних нейронів, які з'єднані один з одним за допомогою сполучних ваг, тобто параметрів моделі, у вигляді шарів. Нейрони – це набір математичних функцій, які модифікують вхідні дані для отримання оцінки бажаного результату. Велика кількість мережевих параметрів робить навчання нейронної мережі пов'язана обтяжливим обчислювальним процесом. Велика кількість мережевих зв'язкових ваг, які необхідно оптимізувати, при навчанні таких моделей зазвичай потребує велику кількість вхідних даних. Приведені вітчизняні досягнення в побудові математичних моделей процесу позапічної обробки чавуну. Описані принципи створення інтегрованої бази даних, що узагальнює інформацію про параметри самих різних технологій знесірнення чавуну, яка включає розроблений системний блок інформаційно-пошукової системи; розроблена концепція експертної системи прийняття рішень з управління технологічними процесами та вибір раціональної технології позапічної десульфурації чавуну; описаний варіант розробленого інформаційно-математичного забезпечення експертної системи модулем позапічної обробки чавуну зернистим магнієм та коінжекцією магнію і вапна; приведені отримані емпіричні рівняння для визначення кінцевого вмісту сірки у розплаві чавуну, а також вираз для оцінки питомої витрати металевого магнію в реагенті. Описані моделі, які присвячені чисельному та фізичному моделюванню явищ, які виникають у ковші під час інжектування, а також вивченню закономірностей газопорошкового потоку.

Ключові слова: десульфурація, чавун, модель, класифікація, аналіз…….....**С.38**

УДК 621.791.92
DOI: 10.31498/2522-9990272024303136

Щербаков С.В. Оптимізація роботи технологічного обладнання секцій вторинного охолодження МБЛЗ / С.В. Щербаков, О.О. Черевко // Наука та виробництво. – 2024. – Вип. 27. – С. 18-24.

Вирішення проблем із якістю слябів, виготовлених в умовах МБЛЗ, пов'язане з налагодженням і оптимізацією роботи системи автоматичного охолодження в секціях ЗВО та коригуванням роботи технологічного обладнання. Розрахунок оптимальних витрат води на секції зон вторинного охолодження є важливим завданням, що вирішується впровадженням комплексних підходів – від експериментальних досліджень до математичного моделювання із застосуванням сучасних програмно-технічних засобів аналізу.

В роботі розглянуто особливості розподілу щільності зрошення поверхні заготовки в зоні вторинного охолодження МБЛЗ. Сформульовано критерії оптимальної роботи обладнання зони вторинного охолодження, що впливають на якість готової продукції та ефективність технологічного процесу. Зроблено аналітичне дослідження потенційних можливостей використання математичного моделювання процесу охолодження заготовок в секціях ЗВО. Показано недостатню ефективність використання моделей на базі класичних рівнянь теплопровідності в зв'язку з певними труднощами та обмеженнями, обумовленими наявністю різних типів теплообміну між поверхнею заготовки, форсунками, зовнішнім середовищем, а також в зв'язку з неможливістю коректного врахування в моделюванні конструктивних особливостей обладнання, його технічного стану, поточних умов технологічного процесу.

Наведено альтернативні методики швидкої експериментальної оцінки роботи форсунок секцій вторинного охолодження, особливістю яких є можливість прямого отримання даних від об'єкту дослідження для подальшої обробки. Проведено аналіз ефективності методик та особливостей їх практичного застосування. Розроблено експериментальну установку та програмне забезпечення для оцінки стану форсунок та розрахунку статистичних характеристик якості охолодження поверхні заготовки з метою отримання рекомендацій щодо досягнення рівномірності тепловідведення та зменшення ймовірності утворення тріщин.

Ключові слова: безперервна розливка, секції зони вторинного охолодження МБЛЗ, форсунки, методики експерименту, програмне забезпечення, візуалізація, статистичний аналіз. ……..…….....**С.55**

2. Електрометалургія сплавів заліза

УДК 669.187.2
DOI: 10.31643/2022/6445.38

Термофізичні властивості синтетичних шлаків системи FeO – MnO – CaO – Al_2O_3 – SiO_2 / Д.А. Есенгалиев, А.С. Байсанов, М.С. Досекенов та ін. // Комплексне використання металургійної сировини. – 2022. – №323. – С.38-45. – Текст англ.

При електрометалургії марганцевих сплавів на показники виробництва з фізико-хімічних властивостей шлаку важливе значення має в'язкість. Оскільки при виплавці марганцевих сплавів основна кількість тепла, що витрачається на відновлювальні реакції, виділяється за рахунок струму, що проходить через рідку фазу шлаку, оскільки опір останньої залежно від складу впливає повноту відновлення марганцю з розплавів. У разі рафінованого феромарганцю силікотермічним способом переважна частина кремнію силікомарганцю рафінується вищими оксидами марганцю або вигоряє за рахунок кисню повітря. У роботі наведено результати термофізичних властивостей шлаків, що представляє систему FeO – MnO – CaO – Al_2O_3 – SiO_2. Лабораторні досліди проводилися на синтетичних шлаках шляхом варіювання основності шлаку CaO/SiO_2 = 1,5-1,9 та концентрації Al2O3 у шлаку в межах 5-15%. В результаті побудовано графіки залежності зазначених властивостей від температурних величин, розраховано енергію активації в'язкої течії та визначено фазові склади дослідних шлаків з використанням математичної моделі діаграми системи FeO – MnO – CaO – Al_2O_3 –

SiO_2. Таким чином, підвищення концентрації оксиду алюмінію проти його звичайного рівня, змінюючи основність шлаку, суттєво вплинуло на фізико-хімічні властивості шлаків, і цим сприяє коригування параметрів процесу електроплавки. При цьому взаємодію деяких фізико-хімічних властивостей шлаків на умови плавлення марганцевих феросплавів доцільно вивчати у взаємозв'язку зі складом шлаків.

Ключові слова: в'язкість, шлаки марганцевих сплавів, температура кристалізації, енергія активації, фазовий склад..……..……..…..……**С.62**

УДК 669.131.7:669.891:669.017.3:669.046.548.2
DOI: 10.31643/2022/6445.38
Бубликов В.В. Дослідження фізико-хімічних процесів в системі твердий силікокальцій–рідкий чавун / В. Б. Бубликов, Ю. Д. Бачинський, О. П. Нестерук // Процеси лиття. – 2022. – № 1. – С. 30-38.

Ситуація з ресурсами вимагає створення нових високоефективних модифікаторів з регульованою кінетикою розчинення. Підвищення ефективності модифікування розплаву та одержання виробів з високоміцного чавуну з оптимальними показниками міцності і пластичності відповідає потребам сьогодення. В технологіях високоміцного чавуну поряд з хімічним складом, мікроструктура та фазовий склад модифікувальних сплавів, а також умови і швидкість їх розчинення в залізовуглецевому розплаві відносяться до головних факторів, які визначають стабільність та ефективність процесів модифікування. В роботі наведено результати дослідження зміни фазового складу та мікроструктури силікокальцію в процесі фізико-хімічної взаємодії з розплавом чавуну. Дослідження показало, що основною складовою мікроструктури вихідного силікокальцію СК30 є дисиліцид кальцію CaSi2, в якій рівномірно розподілені кристали кремнію Si і лебоїту FeSi2 переважно голкоподібної форми. Експериментально встановлено, що після вилучення з розплаву поверхня залишку зразків силікокальцію покрита реакційним шаром, що утворюється в результаті фізико-хімічної взаємодії в системі твердий силікокальцій–рідкий чавун, і в якому відбувається перенесення хімічних елементів: кремнію і кальцію із силікокальцію в чавун, а заліза – із рідкого чавуну в силікокальцій. В зоні реакційного шару, що примикає до силікокальцію, спостерігається комбінація двох складових – кремнієвмісних фаз округлої форми з високим вмістом кальцію (71,16 % Ca, тобто фаза Ca2Si) в кількості 45,36 % та заліза (62,34 % Fe, тобто фаза FeSi) в кількості 54,64 % з конгруентними температурами плавлення 1314 та 1410 0С, відповідно, які можуть негативно впливати на стабільність та ефективність процесу модифікування. Маса реакційного шару залежить від температури розплаву чавуну і тривалості перебування в ньому зразка. Експериментально визначена швидкість зміни маси зразків силікокальцію СК30 під час їх витримки в рідкому чавуні при температурах 1400 та 1450 0С знаходиться в межах 1,0-1,2 г/с, що в 1,5-2,0 рази менше, ніж у феросиліцію ФС75 (1,5-2,4 г/с), і в 2,3-3,0 рази менше, ніж у феросиліцій-магнієвої лігатури ФСМг7 (2,3-3,6 г/с). Встановлені особливості перебігу фізико-хімічних процесів в системі твердий силікокальцій–рідкий чавун необхідно враховувати під час розроблення технологій модифікування чавуну із застосуванням силікокальцію та інших сплавів, що вміщують кальцій.

Ключові слова: чавун, плавлення, модифікування, силікокальцій, фазовий склад……..……..……..**С.70**

УДК 621.746.6:531.42:62-412

DOI: 10.15407/steelcast2023.01.019

Комп’ютерне моделювання процесу сифонного відливання крупного сталевого циліндричного зливка / Ю.В. Костецький, Є.О. Волченков, Г.П. Стовпченко, Є.В. Тацький // Метал та лиття України. – 2023. – №1. – С.19-27.

Електрошлаковий переплав є одним з основних способів отримання високоякісних крупних зливків зі спеціальних сталей та сплавів, зокрема для потреб енергетичного машинобудування. Відливання у виливниці є найбільш поширеним способом отримання великогабаритних витратних електродів для здійснення електрошлакового переплаву. З метою визначення раціональних параметрів процесу відливання крупних циліндричних зливків у виливницю сифонним способом було проведено комп'ютерне моделювання. У даній роботі представлено результати моделювання руху потоків рідкого металу під час заповнення виливниці рідким металом та процесу формування скоринки твердого металу в цей час в умовах відливання сифонним способом круглого сталевого зливка діаметром 1 м з відношенням висоти до діаметра рівним 6,5 і масою близько 40 тонн. Аналіз результатів комп’ютерного моделювання показує, що у ванні рідкого металу у виливниці спостерігається нестаціонарна гідродинамічна картина, яка змінюється в міру заповнення внутрішнього об'єму виливниці рідким металом. Затвердіння металу починається вже на початковому етапі заповнення виливниці. Проте під впливом потоків рідкого металу утворення скоринки затверділого металу відбувається нерівномірно внаслідок неоднорідного розподілу теплового потоку від рідкометалевої ванни по периметру і висоті стінки виливниці, що створює умови для розвитку гарячих поверхневих тріщин. Для запобігання утворенню поверхневих дефектів рекомендується вжити заходів зі стабілізації висхідного потоку рідкого металу. Також досліджено вплив попереднього підігріву виливниці на інтенсивність затвердіння в ході її заповнення рідким металом. Попередній підігрів зменшує кількість твердої фази, що утворюється протягом заповнення виливниці рідким металом. Найбільш суттєве пригнічення утворення твердої фази зі зменшенням об’ємної частки затверділого металу більше ніж на 40 % спостерігається за умови попереднього нагріву стінки виливниці не менше ніж до 550–600 °С.

Ключові слова: комп’ютерне моделювання, сифонне відливання, круглий сталевий зливок, затвердіння, потоки рідкого металу, тверда скоринка, виливниця…….……....…….**С.79**

УДК 669.187; 621.365.22

DOI: 10.34185/1991-7848.2023.01.9

Тимошенко С.М. Енергоефективні рішення щодо рафінування сталі в електродуговій печі ливарного класу / С.М. Тімошенко, Е.М. Нємцев, М.В. Губинський // Метал та лиття України. – 2023. – №26. – С.99-111.

Анотація. Проведено чисельне моделювання кінетики десульфурації сталі в 3–12 т дугових сталеплавильних печах (ДСП) ливарного класу. У «глибокій» сталеплавильній ванні з коефіцієнтом форми 2,5 та пневматичним перемішуванням швидкість видалення сірки збільшується в 5–6,7 разів, порівняно зі стандартною ванною з коефіцієнтом форми 4,5 без перемішування, за рахунок інтенсифікації масообміну в двофазній області та розвитку плівкової десульфурації. Внесок поглиблення ванни у прискорення видалення сірки становить у середньому 23%. Отримані результати дозволяють очікувати скорочення

технологічного періоду в середньому в 1,5 рази, а плавки в цілому на 8−10 %. Економія електроенергії в ДСП малої місткості ливарного класу очікується 60−70 кВтг/т.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, енергоефективність, «глибока» ванна, десульфурація, пневматичне перемішування…….…….……....……..**С.88**

УДК 669.187.004.18
DOI: 10.37434/sem2024.01.04

Застосування графітованих гнотових електродів на 50-тонній дуговій сталеплавильній печі змінного струму типу ДСВ-50 / О.Г. Богаченко, А.В. Черняков, І.О. Гончаров та ін. // Сучасна електрометалургія. – 2024. – №1. – С.32-39.

На 50-тонній печі типу ДСВ-50 трифазного змінного струму проведені експериментальні плавки із застосуванням графітованих гнотових електродів. Виплавляли низьколеговані, високоміцні леговані і інструментальні сталі дванадцяти марок. Випробувані гноти чотирьох складів (F18, F22, F23 і F27). Плавки проводили в безперервному режимі плавка на плавку. Показано, що застосування гнотових електродів забезпечило: зниження питомої витрати графітованих електродів на 16,1…31,4 %; економію активної електроенергії у середньому на 16,5 %; збільшення продуктивності печі на 18…27 %; зниження вмісту азоту в сталі у середньому на 20 %; зниження вигару легуючих елементів (Cr, Ni, V, Mo і ін.) на 8,3…14,7 %; зниження загального вигару шихти на 3,5…9,6 %. Показано, що в порівнянні з техніко-економічними показниками, отриманими на печі ДС-6Н1, збільшення ємності печі з 6 до 50 т не знизило ефективність застосування гнотових електродів на дугових печах змінного струму, тобто гнотові графітовані електроди можна успішно використовувати на дугових печах необмеженої ємності.

Ключові слова: гнотові електроди, дугові печі, електрична дуга, подовжені дуги, енергозбереження……...……..**С.101**