

Д. М. Тогобицька, д.т.н., проф., ORCID 0000-0001-6413-4823

І. Р. Снігура, к.т.н., н.с, ORCID 0000-0001-5872-7403

В. П. Піптюк, к.т.н., с.н.с, ORCID 0000-0002-2915-1756

С. В. Греков, н.с, ORCID 0000-0003-2848-0999

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

НОВИЙ ПІДХІД ДО ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ СПРЯМОВАНОГО ФОРМУВАННЯ КІНЦЕВИХ РОЗПЛАВІВ ПРИ ДОВЕДЕННІ СТАЛІ НА УСТАНОВЦІ «КІВШ-ПІЧ»

Анотація. Ціль роботи полягає у розкритті сутності запропонованого нового підходу щодо опису закономірностей розподілу елементів між металевою та шлаковою фазами, підгрунтам для розробки якого слугували створені інформаційний та інтелектуальний ресурси бази знань «Металургія» розробленої в ІЧМ НАНУ. Інформаційна складова представляє собою бази даних про властивості металургійних розплавів «Метал», «Шлак», «Феросплави» та «Метал-Шлак-Газ», що безперервно поповнюються сучасними даними і містять результати власних й промислових експериментальних досліджень властивостей металургійних розплавів і літературного пошуку (статті, патенти, винаходи, наукові розробки, монографії). У якості наукового підґрунтя для опису процесів взаємодій між фазами в роботі використана оригінальна концепція спрямованого хімічного зв'язку, а також накопичений в ОФХП досвід створення інформаційно-аналітичних систем прогнозування та управління процесами виплавки чавуну та сталі. Застосування концепції спрямованого хімічного зв'язку забезпечило зниження факторного навантаження у ході моделювання за рахунок процедури «згортки» хімічного складу багатокомпонентних систем у параметрах міжатомної взаємодії при цьому враховано вклад кожного компоненту розплаву. Головна відмінність запропонованого підходу від існуючих, полягає у врахуванні міжатомних зв'язків при взаємодії розплавів металу та шлаку, комплексних співвідношень їх фізико-хімічних і теплофізичних властивостей, а також значимих технологічних показників при позапічній обробці на установці ківш-піч (УКП). З метою візуалізації та роз'яснення етапів нового підходу представлена макросхема для вирішення задач прогнозування кінцевих продуктів сталі при її позапічній обробці на УКП. Розроблено адекватні математичні моделі ($R^2 \geq 0,9$), які дають можливість кількісно оцінити ефективність засвоєння та розподілу основних елементів добавок, що визначають технологічну цілеспрямованість процесу обробки напівпродукту та обумовлюють підбір з цих позицій раціональних складів легуючих, рафінуючих компонентів у межах сучасної вітчизняної сировинної бази.

Ключові слова: металургійні розплави, параметри міжатомної взаємодії, прогнозні моделі, розподіл елементів, УКП.

Посилання для цитування: *Тогобицька Д. М., Снігура І. Р., Піптюк В. П., Греков С. В.* Новий підхід до вирішення проблеми спрямованого формування кінцевих розплавів при доведенні сталі на установці «ківш-піч». *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 296-309. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-296-309

Стан проблеми. В умовах ринкової економіки однією з найважливіших задач державного значення є підвищення якості та конкурентоздатності вітчизняної металопродукції на світовому ринку і забезпечення машинобудівної та інших металоспоживаючих галузей промисловості продукцією необхідного сортаменту. У цьому зв'язку особливу роль відіграють технології виробництва якісного металу з обов'язковим включенням у металургійний цикл - етапу його позапічної обробки, як відповідальної ланки доведення сталі до затребуваного складу, головним чином конструкційної, підшипникової, електротехнічної, високоміцної, корозійностійкої та інших сталей спеціального призначення. Виплавка сталі необхідної якості обумовлена значними труднощами, оскільки пов'язана з протіканням складних фізико-хімічних процесів, частина з яких важко піддається управлінню або зовсім не є такою.

Незважаючи на значні успіхи фундаментальних наук в поясненні механізму процесів, що протікають при позапічній обробці напівпродукту, накопичені знання ще не достатні для реального управління виробництвом того чи іншого сплаву, оскільки відомості щодо величини реальних взаємодій у розплавах неоднозначні і потребують постійного пошуку. Разом з тим виникає необхідність поглиблення пізнання процесів фізико-хімічних взаємодій, що протікають у багатофазному середовищі. Вирішення даного завдання можливе за рахунок розробки нових підходів та технологічних схем з урахуванням особливостей вітчизняної феросплавної бази і залученням комплексу сучасних інформаційних технологій.

Формування якісної сталі є результатом наскрізного процесу, деякі аспекти якого закладаються чистотою шихтових матеріалів, ще на етапах отримання чавуну і на всіх подальших переділах, які послідовно обумовлюють підбір необхідних технологічних рішень по доведенню й обробці металевого напівпродукту з метою задоволення вимог сформованих замовником до відповідної металопродукції.

Значний науковий доробок та промислове освоєння інноваційних технологічних рішень з виробництва та доведення сталі на вітчизняних заводах та підприємствах ближнього зарубіжжя склали напрацювання Гасика М. І. [1], Віхлевщука В. А. [2], Нікітіна М. С [3], Жучкова В. І. [4] та інших. В ІЧМ НАНУ розвивається альтернативний підхід до оцінки

ступеню засвоєння та вирішення задач моделювання закономірностей розподілу основних елементів легуючих компонентів, які поєднують склад, структуру, властивості розплавів і особливості технології доведення сталей на УКП.

Мета роботи – наукове обґрунтування критеріїв та комплексних показників для розробки алгоритму, який покладено в основу нового підходу до оцінки ефективності розподілу основних елементів добавок у системі «метал-шлак» з позицій фундаментальних положень концепції спрямованого хімічного зв'язку для направленоного формування якісного металу.

Основний матеріал досліджень. Важливе значення при описі процесів фізико-хімічних взаємодій у системі «метал-шлак» відіграє наукове підґрунтя у вигляді структури моделей металевих та шлакового розплавів, що слугує відправною точкою для аналізу. В залежності від обраного підходу щодо будови металургійних розплавів та обмежень, що закладені у них, зміст трактування взаємодій у системі «метал-шлак» може різнитись.

Незважаючи на значний внесок Архарова В. І., Самаріна А. М., Ватоліна Н. А., Островського О. І., Новохатського І. А., Белова Б. Ф., Троцана А. І. та інших в розвиток уявлень про структуру і будову металевих розплавів, сучасні моделі й концепції вимагають подальшого удосконалення і обґрунтування, оскільки не дозволяють в повній мірі врахувати чинники, що впливають на формування фізико-хімічних властивостей металевих розплавів, що ускладнює опис нерозривного ланцюга «склад - структура - властивість». Саме тому є важливим створення базисного комплексу оперативних прогнозних моделей розроблених на основі накопичених достовірних експериментальних та технологічних даних про хімічний склад, найважливіші фізико-хімічні, експлуатаційні, теплофізичні властивості металургійних розплавів (сталь, шлак, добавка), які слугують інформаційною основою для теоретичної та прикладної металургії при розробці нових методів направлених на спрямоване формування якісної конкурентоздатної металопродукції.

Значні досягнення в області моделювання металургійних процесів на рівні міжатомної взаємодії реалізовані в концепції спрямованого хімічного зв'язку, розробленої Приходько Е. В. в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова [5]. Хімічна індивідуальність системи, реакційна здатність, структурний стан розплавів виражаються за допомогою методу кодування хімічного складу дослідного розплаву в інтегральних параметрах міжатомної взаємодії: Z^y – параметр зарядового стану системи, e ; d – середньостатистична між'ядерна відстань, 10^{-1} нм; tga – константа для

кожного елементу, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ρ_1 – спрямована зарядова щільність, е/нм.

Ефективність даного методу у вирішенні нагальних питань металургійної галузі підтверджена багатолітнім досвідом та плідною співпрацею ІЧМ з провідними підприємствами України на яких впроваджено ряд розроблених технологічних управляючих рішень спрямованих на покращення якості сталі, а також новітніми розробками по грантовим напрямкам наукової діяльності [6-9].

У якості вихідних даних при моделюванні нами використано інформаційний ресурс, створений в ІЧМ НАНУ - репрезентативні бази даних «Банка даних «Металургія» (БДМет) – «Метал», «Шлак», «Феросплави» [9], які знаходяться в стадії постійної експлуатації і активного поповнення сучасними промисловими (ПАТ «ДМК», ПрАТ «Дніпроспецсталь», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» та інші) та літературними (статті, патенти, винаходи, наукові розробки, монографії) даними. Інформаційна потужність таких баз даних дозволяє оперативно генерувати моделі зі зменшенням їх розмірності та забезпеченням відповідної стійкості при зміні вхідних даних.

Грунтуючись на вказаних напрацюваннях розроблені оперативні прогностичні моделі для визначення температур плавлення та кристалізації, в'язкості та щільності залізобуглецевих та хромонікелевих сталей широкого сортаментного ряду, алюмінієвих, магнієвих, жароміцних нікелевих сплавів з високими показниками детермінованості на рівні $R^2 \geq 0,97$ [10]. Працездатність усіх розроблених аналітичних залежностей оцінювалась шляхом співставлення з експериментальними значеннями, іншими розрахунковими підходами та розрахунками за програмними комплексами, а також на даних, які не входили в висхідні вибірки при генерації моделей, що підтвердило їх адекватність та математичну стійкість. Запропоновані моделі для визначення плавкості хромонікелевих сталей рекомендовано застосовувати при наявності основних елементів Cr, Ni від 0 до 30%; для залізобуглецевих сталей обмеження по вмісту заліза у матриці розплаву до 97%, а сумарної легуючої складової до 20%; для алюмінієвих та магнієвих сплавів характерна конструкційна схожість моделей, що пов'язано з кластерною подібністю будови їх однокомпонентних металевих розплавів (Al, Mg), які складають основу даного класу сплавів (табл. 1.).

На всіх стадіях процесу виплавки якісної сталі застосовують добавок різного цільового призначення (процеси шлакоутворення, розкислення, легування, модифікування неметалевих включень, доведення розплаву за хімічним складом). Використання добавок у вигляді чистих компонентів або сумішей, феросплавів, багатокомпонентних лігатур пов'язане з

актуалізацією питання прогнозування і їх фізико-хімічних та теплофізичних властивостей, як важливої складової процесів формування якісного металу для подальшого виробництва необхідної металопродукції.

Таблиця 1 – Особливості прогнозування плавкості (температур ліквідус та солідус) металевих розплавів.

Розплав	Модель	Точність	Особливість
Хромонікелеві сталі	$T_L = 10^3 \times (1,673 + 0,199 Z^Y + 0,387 d + 11,122 \text{ tg}\alpha)$ $T_S = 10^3 \times (0,452 + 0,186 Z^Y + 0,956 d + 16,434 \text{ tg}\alpha)$	$R^2 \geq 0,93$	Вплив елементів легуючої підсистеми
Залізовуглецеві сталі (інструментальні, конструкційні, рельсові та інші)	$T_L = 10^3 \times (2,994 + 0,176 Z^Y - 0,476\rho_1)$ $T_S = 10^3 \times (6,359 + 0,566 Z^Y - 1,571\rho_1)$	$R^2 \geq 0,93$	Вміст заліза у матриці розплаву
Жароміцні нікелеві сплави	$T_L = 10^3 \times (1,195 - 0,112 \rho_1 + 9,198 \text{ tg}\alpha_\gamma)$ $T_S = 10^3 \times (1,456 - 0,21 \rho_1 + 8,712 \text{ tg}\alpha_\gamma)$	$R^2 \geq 0,82$	Тугоплавкі зміцнювачі розплаву (Mo, W, Re, Ru, Ta)
Алюмінієві сплави	$T_L = -205,25 \cdot (\rho_1) + 1011,5$	$R^2 \geq 0,97$	Основу розплавів складають легкі метали Al та Mg

Аналіз взаємозв'язків першочергових властивостей феросплавів серед яких – температура плавлення (T_n , °C), щільність ($D \times 10^3$, кг/м³), окислюваність та теплофізичні характеристики – теплопровідність λ , Вт/м·К, теплоємність C , Дж/кг·К, теплота плавлення $Q_{пл}$, кДж/кг, коефіцієнт температуропровідності $\alpha \cdot 10^{-3}$, м²/с та інші з параметрами міжатомної взаємодії дозволив встановити їх інформативну навантаженість та сформувати структуру прогнозних моделей [11].

Наприклад, для феросиліцію, теплоємність феросплаву, яка відображає кількість тепла, що витрачається на його нагрівання, повинна забезпечувати мінімальне охолодження рідкої сталі при його введенні. З рис. 1а видно, що при збільшенні середньостатистичної між'ядерної відстані d відбувається ослаблення зв'язків між взаємодіючими атомами розплаву, а отже у такої системи немає необхідності у додатковому нагріванні для розплавлення та ступінь охолодження металу буде мінімізований.

Значення щільності промислових феросплавів для ефективного протікання реакцій взаємодії на межі розділу фаз «метал-добавка» повинні

бути наближені до щільності металевого розплаву в який вводиться добавка (зазвичай на рівні 5000-7000 кг/м³). До таких належать ФС20, ФС25, ФС45, які займають верхнє положення на рис. 1б та щільність, яких лімітується зарядовим станом системи ZY. У той же час, для марок ФС90, ФС92 низькі значення параметру ZY до 1.3 (рис. 1б), які спричинені наближенням цих розплавів до моносплаву по вмісту кремнію та низька щільність приведуть до їх спливання на поверхню металевого розплаву сталі, активного окислення та низького коефіцієнту засвоєння провідного елементу. Враховуючи інформативність параметрів міжатомної взаємодії сформовані моделі для прогнозування властивостей феросиліцію, які мають вид: $T_{пл} = f(Z^Y, \rho_1)$ $R^2 = 0,6488$; $D = f(Z^Y)$ $R^2 = 0,9607$; $C_{тв} = f(d)$ $R^2 = 0,7696$; $\lambda = f(\rho_1)$ $R^2 = 0,9843$; $Q = f(\rho_1)$ $R^2 = 0,9537$; $\rho = f(\rho_1)$ $R^2 = 0,9666$; $\sigma = f(\text{tg}\alpha)$ $R^2 = 0,9817$.

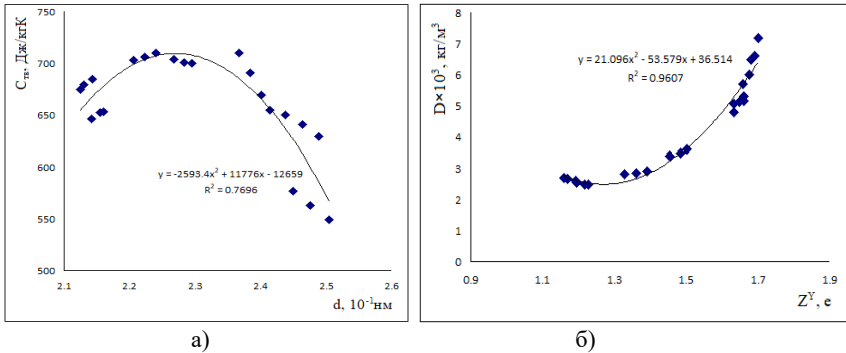


Рисунок 1 – Взаємозв'язок параметрів міжатомної взаємодії з властивостями феросиліцію: а) теплоємність; б) щільність.

Задля достовірного процесу моделювання були об'єднані репрезентативні вибірки даних для феромарганцю і феросилікомарганцю, оскільки вони близькі по вмісту марганцю та показникам щільності, що говорить про подібність будови їх розплавів. Враховуючи основні положення концепції спрямованого хімічного зв'язку та встановлені залежності між параметрами міжатомної взаємодії з властивостями феросплавних розплавів отримані аналітичні вирази, які мають вид: $T_{пл} = f(d, \rho_1)$ $R^2 = 0,70$; $D = f(Z^Y, d)$ $R^2 = 0,763$; $C_{тв} = f(Z^Y, d, \rho_1)$ $R^2 = 0,874$; $\lambda = f(\rho_1, d, \text{tg}\alpha)$ $R^2 = 0,870$; $Q = f(Z^Y, \text{tg}\alpha)$ $R^2 = 0,95$; $\rho = f(Z^Y, \Delta d, \rho_1)$ $R^2 = 0,917$; $\sigma = f(Z^Y, \Delta d, \rho_1)$ $R^2 = 0,7578$.

У більшості моделей, зокрема, прослідковується тісний зв'язок з мікронеоднорідною будовою досліджуваних розплавів вираженою параметром ρ_1 , що свідчить про збереження впливу спадковості та тісні

кластерні зв'язки, а отже необхідністю підбору відповідного температурного режиму для досягнення гомогенності системи без невикористаного перегріву металу. Тому час плавлення феросплави може носити описовий характер початку руйнування кластерних зв'язків [12-13]. Для визначення часу плавлення комплексних феросплавів розроблені моделі у системах: *Fe-Mn-V*, *Fe-Mn-Nb*, *Fe-Nb-Si*, *Fe-Nb-Al*, *Fe-Si-B*, *Fe-Mn-Si-V*, *Fe-Nb-Si-Al*, *Fe-Si-V-Mn*, *Fe-Mn-Si-V-Ti*, *Fe-Mn-Si-Nb-Al*.

Для марганецьвмісних феросплавів:

$$\tau, c = f(\rho l) \quad R^2 = 0.982 \quad (1)$$

Для ванадійвмісних феросплавів:

$$\tau, c = f(\rho l, tg\alpha) \quad R^2 = 0.692 \quad (2)$$

Для ніобійвмісних феросплавів:

$$\tau, c = f(Z^y, d, \Delta Z^y, \Delta d) \quad R^2 = 0.725 \quad (3)$$

Для борвмісних феросплавів:

$$\tau, c = f(\rho l, d) \quad R^2 = 0.903 \quad (4)$$

Висока точність прогнозу досягнута за рахунок врахування фізико-хімічної індивідуальності кожної із систем та їх мікронеоднорідності (ρl), (ΔZ^y , Δd). Враховуючи вищевикладене сформований блок одержаних закономірностей для прогнозування фізико-хімічних, теплофізичних властивостей розплавів сталей, сплавів та феросплавів, покладено в основу алгоритму прогнозування закономірностей розподілу елементів при доведенні сталі на УВП. Запропонований комплекс моделей для прогнозування фізико-хімічних, теплофізичних властивостей металу, шлаку, добавок та результати експертної оцінки їх адекватності дають основу вважати, що стануть дієвим інструментом для оцінки та прийняття керуючих впливів для виплавки сталі заданої якості. Як показують наші варіанти генерації структури моделей для коефіцієнтів розподілу елементів між продуктами плавки, значну роль відіграють співвідношення $K_T = T_{пл.ф}/T_{сталі}$ (рис.2). Зокрема для сталі 09Г2С та її модифікацій, у результаті проведеного статистичного аналізу за визначенням критерію Стюдента встановлено значимість температурного фактору на розподіл кремнію у системі «метал-шлак» та графічно представлено на рис.2. При такому підході ступінь ефективності засвоєння добавок оцінюється наближенням системи «метал-шлак» до рівноваги по L_c .

Так, наприклад, для сталі 09Г2С, яка виготовлена в умовах ДМК на основі узгоджених даних методами матеріального балансу виконаний аналіз розподілу елементів Si та Mn при позапічній її обробці на УВП. Виявлена структурна подібність моделей для визначення коефіцієнтів розподілу як кремнію так і марганцю, що пов'язане з їх близькістю по будові кластерів однокомпонентних розплавів – мікронеоднорідністю. В

результаті проведеного аналізу отримано адекватні моделі для обчислення коефіцієнтів розподілу S_i та M_p в залежності від інтегральних параметрів початкового хімічного складу сталі, шлаку та параметрів технології, які мають вигляд: $L_{Mn} = f(Z_{поч}^{Me}, K_T, I_{прод})$; $L_{Si} = f(d_{поч}^{Me}, tg\alpha_{поч}^{Шл}, K_T, T_{поч}^{Me}, I_{прод})$.

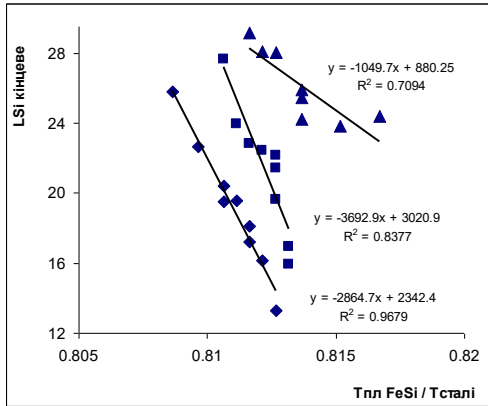


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту розподілу кремнію від співвідношення $K_T = T_{пл.ф}/T_{сталі}$ для сталі марки 09Г2С.

На рис. 3 представлена макросхема алгоритму прогнозування складу кінцевих продуктів при позапічній обробці (доведенні) сталі, яка розроблена на основі виявлених залежностей коефіцієнтів розподілу від параметрів початкових розплавів, фізико-хімічних і теплофізичних властивостей добавок та технологічних параметрів позапічної обробки сталі на УКП. Першим етапом до реалізації дії макросхеми є систематизація та експертна оцінка достовірності промислових даних, що включає в себе фільтрацію «зашумленості» та аналіз «викидів», наявність яких може бути спричинена ймовірною похибкою проведеного хімічного аналізу внаслідок людського фактору, тому слід виключити такі дані з вихідної вибірки. У результаті критичної оцінки розрізненого масиву даних формується достовірна вибірка для фізико-хімічного аналізу. Згідно з концепцією (рис.3) виконуються розрахунково-аналітичні дослідження по впливу складу вихідних продуктів на УКП, добавок, що вводяться, та параметрів технології для формування кінцевого складу сталі, а також аналогічно для кінцевого шлакового розплаву. Виявлені закономірності складають основу наступного блоку, спрямованого на розробку моделей та алгоритму для прогнозування продуктів доведення сталі з урахуванням ефективності розподілу елементів між металевою та шлаковою фазами. Особливістю трактування розподілу компонентів між кінцевим металом та шлаком, згідно даного підходу, полягає у вираженні через початкові параметри міжатомної взаємодії

металу, шлаку, добавок та комплексні співвідношення їх фізико-хімічних, теплофізичних властивостей і технологічні показники обробки. Подальшим є перевірка умов узгодженості кінцевих розплавів та наближення їх до рівноважного стану, по якому оцінюється ступінь завершеності основних термодинамічних взаємодій.

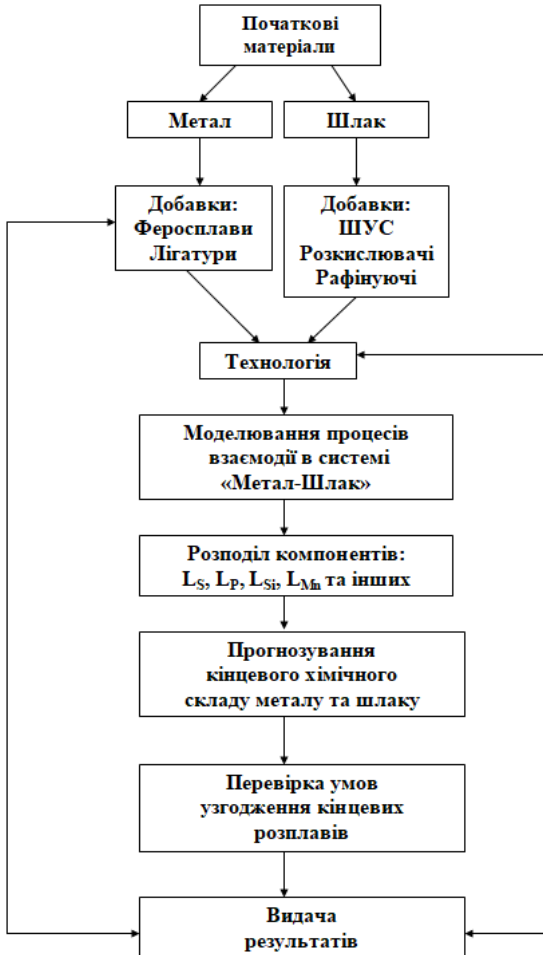


Рисунок 3 – Концептуальна схема для вирішення задач прогнозування кінцевих продуктів сталі при її позапічній обробці на УКП.

Одержані в роботі результати по прогнозуванню коефіцієнтів розподілу елементів між кінцевими продуктами у системі «метал-шлак» є піддрунтям для вироблення рекомендацій щодо вибору ефективних добавок та технологічних факторів, які забезпечать одержання сталі, яка відповідатиме затребуваним показникам. У разі, коли унеможливується регулювання блоків технології та добавок по запропонованій схемі у зв'язку з жорсткими вимогами замовника, рекомендується у якості альтернативи перегляд якості шихтових матеріалів, також одним із ефективних методів з обов'язковою економічною оцінкою доцільності є проведення конструкційного вдосконалення обладнання, що використовується.

Висновки

Сформовані бази експериментальних даних фізико-хімічних, теплофізичних властивостей феросплавів та моделей структури металевих, шлакових розплавів створили передумови для прогнозування першочергових властивостей (температура плавлення та кристалізації, щільність, в'язкість, електропровідність та інші) сталей, сплавів та феросплавів вітчизняного виробництва з урахуванням їх фізико-хімічних особливостей та мікронеоднорідної будови на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку з високою точністю прогнозу.

Заходами повноцінного протікання реакцій між металевою та шлаковою фазами, а отже забезпечення заданого складу, структури та спрямованого формування необхідних властивостей сталей є наявність у металургів-технологів апарату високоточних й стійких оперативних прогнозних моделей комплексу їх фізико-хімічних властивостей, які в реальному часі описують іонообмінні процеси у системі «метал-шлак». Саме оперативний промислово-технологічний контроль цих процесів являється важливою резервною ланкою для виробництва конкурентоздатної сталі у змінних сировинно-шихтових та економічних умовах країни.

Запропоновано новий спосіб прогнозування розподілу провідних елементів добавок, який заснований на вираженні кінцевого вмісту елементів через початкові параметри металургійних розплавів у поєднанні з значимими технологічними параметрами позапічної обробки у конкретних умовах виробництва. Таке трактування розподілу елементів у шлакометалевому розплаві дозволило підкреслити важливість виявлених закономірностей та врахувати інформативні технологічні фактори впливу, на відміну від методів, де враховуються тільки балансові співвідношення між початково введеним та кінцевим вмістом добавки, що робить виконане дослідження актуальним.

Одержані закономірності покладені в основу алгоритму прогнозування закономірностей розподілу елементів при позапічній обробці сталі на УКП, що представлено у вигляді поетапної концептуальної схеми та це дозволить виконати оцінку ефективності використання добавок і визначити більш придатні умови для повноти протікання процесів легування, рафінування сталі.

Перелік посилань

1. Гасик М. И., Лякишев Н. П. Физикохимия и технология электроферросплавов: Учебник. – Дн-ск: Системные технологи, 2008. – 453.
2. Вихлевщук В. А., Харахулах В. С., Бродский С. С. Ковшевая доводка стали: Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
3. Никитин М. С., Рябова А. В. К вопросу об оценке степени усвоения и равномерности распределения олова при легировании стали. – Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2011. – № 36. – С. 26 – 29.
4. Жучков В. И., Шешуков О. Ю., Лозовая Е. Ю. Сравнительная оценка эффективности усвоения ферросплавов при выплавке стали. – Электрометаллургия. 2004. – № 5. – С. 9 – 11.
5. Приходько Э. В. Металлохимия многокомпонентных систем. – М.: Металлургия. – 1995. – 320 с.
6. Бабаченко А. И. Оптимизация химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего стабилизацию механических и повышение эксплуатационных свойств // Бабаченко А. И., Тогобицкая Д. Н., Козачек А. С., Кононенко А. А., Кныш А. В., Снигура И. Р. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – № 2. – С. 67 – 73.
7. Togobitskaya D. N. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit. /Togobitskaya D. N., Piptyuk V. P., Petrov A. F., Grekov E. V., Mirgorodskaya A. S. // Metallurgist. – 2019. – Vol 62. No (11-12). pp. 1115-1122.
8. Піптюк В. П. Експериментальне дослідження підвищення технологічності брикетів феросиліцію для виробництва сталі /В. П. Піптюк, Д. М. Тогобицька, К. В. Баюл, І. М. Логозинський, Б. А. Левін, О. П. Петров, С. В. Греков, Г. О. Андрієвський // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. – Дніпро. – 2018. – № 21. – Вип. 1. – С.50-55.
9. Тогобицкая Д. Н. Базы данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали / Тогобицкая Д. Н., Піптюк В. П., Петров А. Ф., Греков С. В., Снигура И. Р., Лихачев Ю. М. Головкин Л. А. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2017. – № 31. – С. 150 – 165.
10. Д. Н. Тогобицкая, М. апер, О. Гридин, И. Р. Снигура Компьютерное моделирование температур плавления и кристаллизации сплавов специального назначения. – Сталь. – № 6. – 2018. – С. 11 – 15.
11. Снігура І. Р. Розробка критеріїв та комплексних показників для опису фізико-хімічних взаємодій в системі «метал-шлак» при позапічній обробці сталі: автореферат дис. канд. техн. наук. Дніпро. 2021. 23 с.

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35
«Fundamentalnye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Выпуск 35
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35*

12. Скребцов А. М. Температура полного распада кластеров металлического расплава. Каково ее значение?. – Известия вузов. Чёр. металлургия. – 2009. – № 2. – С. 28–32.
13. Ладьянов В. И., Новохатский И. А., Логунов С. В. Оценка времени жизни кластеров в жидких металлах. – Металлы. – 1995. – №2. – С. 13 – 22.

References

1. Gasik M.I., Lyakishev N.P. *Fizikohimiya i tehnologiya elektroferrosplovav: Uchebnik. [Physicochemistry and Technology of Electroferroalloys: Textbook.]* Dn-sk: Sistemnyie tehnologii [System technologies], 2008. 453 p. [In Russian]
2. Vihlevschuk V.A., Kharakulakh V.S., Brodskiy S.S. Kovshevaya dovodka stali [Lapping steel in a ladle]. Dnepropetrovsk. *Sistemnyie tehnologii [System technologies]*, 2000. 190 p. [In Russian]
3. Nikitin M.S., Ryabova A.V. K voprosu ob otsenke stepeni usvoeniya i ravnomernosti raspredeleniya olova pri legirovanii stali [To the question of assessing the degree of assimilation and uniformity of distribution of tin during alloying of steel]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the South Ural State University]*. 2011. №36. p. 26 – 29. [In Russian]
4. Zhuchkov V.I., Sheshukov O.Yu., Lozovaya E.Yu. Sravnielnaya otsenka effektivnosti usvoeniya ferrosplovav pri vyiplavke stali [Comparative evaluation of the efficiency of assimilation of ferroalloys in steelmaking]. *Elektrometallurgiya [Electrometallurgy]*. 2004. №5. p. 9 – 11. [In Russian]
5. Prihodko E.V. *Metallohimiya mnogokomponentnyih sistem [Metallic chemistry of multicomponent systems]*. M.: Metallurgiya [Metallurgy]. 1995. 320 p. [In Russian]
6. Babachenko A.I. Optimizatsiya himicheskogo sostava stali dlya zheleznodorozhnyih koles, obespechivayushego stabilizatsiyu mehanicheskikh i povyishenie ekspluatatsionnyih svoystv [Optimization of chemical composition of steel for railroad wheels providing stabilization of mechanical and increase of operational properties]. Babachenko A.I., Togobitskaya D.N., Kozachek A.S., Kononenko A.A., Knyish A.V., Snigura I.R. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost [Metallurgy and heat treatment of metals]*. 2016. № 2. p. 67 – 73. [In Russian]
7. Togobitskaya D.N. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit. Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P., Petrov A.F., Grekov E.V., Mirgorodskaya A.S. *Metallurgist*. 2019. Vol 62. No (11-12). pp. 1115-1122. [In English]
8. Piptyuk V.P. Eksperimentalne doslidzhennya pldvischennya tehnologichnostI briketiv ferrosilitslyu dlya virobnitstva stali [Experimental study of increasing the manufacturability of ferrosilicon briquettes for steel production]. V.P. Piptyuk, D.M. Togobitska, K.V. Bayul, I.M. Logozinskiy, B.A. Levin, O.P. Petrov, S.V. Grekov, G.O. Andrievskiy. *SuchasnI problemi metallurgii. NaukovI vIstI [Modern problems of metallurgy. Scientific news.]*. Dnipro. 2018. № 21. Vip. 1. – p.50-55. [In Ukrainian]
9. Togobitskaya D.N. Bazyi danyih i modeli dlya ekspertnoy otsenki effektivnosti ispolzovaniya ferrosplovav pri proizvodstve stali [Databases and models for expert assessment of the efficiency of using ferroalloys in steel production]. Togobitskaya

- D.N., Pipyuk V.P., Petrov A.F., Grekov S.V., Snigura I.R., Lihachev Yu.M. Golovko L.A. *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. 2017. № 31. p. 150 – 165. [In Russian]
10. D.N. Togobitskaya, M. Shaper, O. Gridin, I.R. Snigura Kompyuternoe modelirovaniye temperatur plavleniya i kristallizatsii splavov spetsialnogo naznacheniya [Computer simulation of melting and crystallization temperatures of special-purpose alloys]. *Stal* [Steel]. № 6. 2018. p. 11 – 15. [In Russian]
 11. Snihura I.R. *Rozrobka kryteriiv ta kompleksnykh pokaznykiv dlia opysu fizyko-khimichnykh vzaemodii v systemi «metal-shlak» pry pozapichnii obrobtsi stali* [Development of criteria and complex indicators for the description of physicochemical interactions in the system "metal-slag" during out-of-furnace processing of steel]: avtoreferat dys. kand. tekhn. nauk. Dnipro. 2021. 23 s. [In Ukrainian]
 12. Skrebcev A.M. Temperatura polnogo raspada klasterov metallicheskogo raspava. Kakovo ee znachenie? [Temperature of complete decomposition of metal melt clusters. What is its meaning?]. *Izvestiya vuzov. CHyor. Metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2009. № 2. S. 28–32. [In Russian]
 13. Lad'yanov V.I., Novohatskij I.A., Logunov S.V. Ocenka vremeni zhizni klasterov v zhidkih metallah [Estimation of the lifetime of clusters in liquid metals]. *Metally* [Metals]. 1995. №2. S. 13 – 22. [In Russian]

D. N. Togobitskaya, Dr. Sci., Professor, ORCID 0000-0001-6413-4823

I. R. Snihura, Ph.D., Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403

V. P. Pipyuk, Ph.D., Senior Researcher, ORCID 0000-0002-2915-1756

S. V. Grekov, Researcher, ORCID 0000-0003-2849-0999

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

A NEW APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF DIRECTIONAL FORMATION OF FINAL MELTS DURING STEEL DEBUGGING AT A LADLE-FURNACE UNIT

Summary. The purpose of the work is to reveal the essence of the proposed new approach to describe the patterns of distribution of elements between the metal and slag phases, the basis for the development of which was the created information and intellectual resources of the knowledge base "Metallurgy" developed in Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov of the NAS of Ukraine. The information component is a database continuously updated with modern data on the properties of metallurgical melts "Metal", "Slag", "Ferroalloys" and "Metal-Slag-Gas" and containing the results of our own and industrial experimental studies of the properties of metallurgical melts and literary searches (articles, patents, inventions, scientific developments, monographs). As a scientific basis for describing the processes of interactions between phases, the work uses the original concept of directed chemical bonding, as well as the experience accumulated

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35

«Fundamentalnye i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii». – 2021. – Vypusk 35

«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

in the department of physicochemical problems of metallurgical processes in creating information and analytical systems for forecasting and controlling the processes of iron and steel smelting. The starting points laid down in the concept of directed chemical bonding are its core and consider melts as chemically unified systems, and simply not mechanical mixtures of components. This approach allows to describe in more detail the physicochemical interactions in a multiphase metallic medium. The main difference between the proposed approach and the existing ones consists in taking into account interatomic bonds in the interaction of metal and slag melts, complex ratios of their physicochemical and thermophysical properties, as well as significant technological parameters during out-of-furnace treatment in a ladle-furnace unit. Adequate mathematical models ($R^2 \geq 0,9$) have been developed, which allow to quantify the efficiency of assimilation and distribution of additives that determine the technological purposefulness of the processing of an intermediate product and determine the selection from these positions of rational compositions of alloying and refining components within the domestic raw material base.

Keywords: metallurgical melts, parameters of interatomic interaction, predictive models, distribution of elements, ladle furnace.

For citation: *Togobitskaya D. M., Snihura I. R., Piptyuk V. P., Grekov S. V. Novyy pidkhid do vyrishennya problemy spryamovanoho formuvannya kintseyvkh rozplaviv pry dovedenni stali na ustanovtsi «kivsh-pich» [A new approach to solving the problem of directional formation of final melts during steel debugging at a ladle-furnace unit]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*, 2021, 35, 296-309. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-296-309*

*Стаття надійшла до редакції збірника 16.11.21 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування
(Протокол засідання редакційної колегії
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*