

<https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003>

УДК 621.74 : 669.13.017

К. А. Сіренко, мол. наук. співроб.; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
ORCID 0000 0003 2613 8094

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОРИГУВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ ПІД ЧАС ПЛАВКИ В ІНДУКЦІЙНИХ ТИГЕЛЬНИХ ПЕЧАХ

Показана можливість мінімізації тривалості процедури корекції хімічного складу розплаву та забезпечення її безпомилковості. Встановлено, що найбільші труднощі у забезпеченні хімічного складу чавуну, який виплавляється в індукційних тигельних печах, пов'язані з суттєвою нестабільністю хімічного складу металобрухту, феросплавів, інших матеріалів, які використовують для корекції хімічного складу розплаву чавуну. Виявлено недоліки відомих методів регулювання хімічного складу чавуну. Запропоновано та обґрунтовано підходи щодо удосконалення методики корекції хімічного складу чавуну при його виплавленні, які враховують у ймовірному аспекті нестабільність матеріалів, що додаються у розплав при коригуванні вмісту в ньому конкретних хімічних елементів, за результатами експрес-аналізу, відібраних з розплаву проб металу. Обґрунтовано застосування методу Монте-Карло при коригуванні вмісту хімічних елементів у чавуні для врахування ймовірнісних оцінок вихідних даних щодо стабільності властивостей матеріалів, які застосовують для регулювання складу чавуну. Розроблено алгоритм визначення необхідної кількості легувального матеріалу для внесення у розплав при коригуванні вмісту конкретного хімічного елемента в складі чавуну. Рекомендовано раціональну послідовність прийняття рішень у процедурі розрахунків кількості легуючого матеріалу, необхідного для додавання у розплав. Розроблено блок-схему для реалізації зазначених ідеології і алгоритму. Запропоновано підходи до визначення «домінуючого» елемента та «точок прицілювання» при корекції хімічного складу чавуну.

Ключові слова: чавун, хімічний склад, коригування, плавка, алгоритм, удосконалення.

Актуальним завданням у сфері виробництва синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення, зокрема, гальмових колодок залізничного транспорту, є удосконалення технології корекції (регулювання) вмісту хімічних елементів у його складі безпосередньо в процесі плавки [1]. Корекція хімічного складу чавуну при його виплавленні є однією з ключових технологічних операцій, яка впливає на якість готової продукції та ефективність її виробництва. Основна вимога до процедури корекції хімічного складу розплаву чавуну полягає в тому, що тривалість її виконання має бути по можливості мінімальною та безпомилковою. Труднощі розв'язання цього завдання полягають, перш за все, у тому, що застосовувані для корекції хімічного складу розплаву чавуну добавки (металобрухт, феросплави, карбюризатори та ін.) мають суттєву хімічну та структурну неоднорідність, яка ускладнює отримання

*Роботу виконано під керівництвом члена-кореспондента НАН України В. Л. Мазура,
e-mail: prof.vlm@ukr.net.

адекватних результатів корекції складу чавуну. У фундаментальній роботі [2] зазначено, що відсутність інформації про характеристики феросплавів та інших добавок, необхідних для використання при корекції хімічного складу чавуну, ускладнює їхнє ефективне застосування в автоматичних системах управління технологічним процесом (АСУТП) виготовлення металопродукції.

Над вирішенням задачі удосконалення і підвищення оперативності виконання та ефективності зазначеної технологічної операції працюють виробничники та вчені [3]. На кожному ливарному заводі розроблено та зафіксовано у відповідних інструкціях процедуру корекції хімічного складу чавуну безпосередньо в процесі його плавки. Вихідною інформацією для цієї корекції є дані про вміст хімічних елементів у розплаві чавуну, отримані в результаті експрес-аналізу відібраної з розплаву проби чавуну. Ця складна технологічна операція, що здійснюється при виплавленні чавуну, вимагає ретельного розрахунку обсягів внесення до розплаву легуючих матеріалів, необхідних для корекції його хімічного складу. Основний недолік відомих методик корекції вмісту хімічних елементів у чавуні на стадії його виплавки полягає в тому, що вони не враховують або враховують лише частково непостійність всіх факторів, які впливають на кінцевий результат (неоднорідність матеріалів, що застосовуються для корекції складу чавуну, коливання температури тощо). У роботі [1] запропоновано підхід до побудови ідеології та алгоритму корекції хімічного складу чавуну безпосередньо в процесі його плавки, який враховує ймовірнісну природу вихідної інформації, необхідної для вирішення цього завдання. У розвиток запропонованої ідеї розглянемо основні принципи застосування ймовірнісного підходу для підвищення надійності процедури корекції вмісту хімічних елементів у чавуні на стадії його плавки.

Основною ланкою процедури доведення складу чавуну до необхідної кондиції є розрахунок кількості відповідних матеріалів, присадок для внесення до розплаву з метою збільшення вмісту конкретних елементів у чавуні. Наприклад, розрахунок порції феромарганцю, необхідної для додавання в розплав рідкого чавуну, щоб підвищити вміст Mn до необхідної величини. Шуканою функцією в такому розрахунку є маса (обсяг, кількість) матеріалу, яку потрібно внести в розплав для отримання необхідного вмісту в чавуні хімічного елемента, що коректується. Позначимо масу коригуючої добавки матеріалу Δq_M . Аргументами є маса розплаву чавуну печі q , кг; необхідний вміст аналізованого елемента в чавуні $E_{\text{ч}}$, %; вміст елемента в розплаві, за результатами вимірювання хімічного складу проби, відібраної з ванни розплаву, E_3 , %; вміст елемента в матеріалі, який застосовується для коригування цього елемента, E_M , %; величина угару $U_{\text{г}}$, %, елемента, вміст якого коригується, у процесі додавання в розплав коригувального матеріалу. Величина ΔE , на яку необхідно збільшити вміст елемента, визначається як $\Delta E = E_{\text{ч}} - E_3$, %.

Відома формула для розрахунку Δq_M має вигляд [1]:

$$\Delta q_M = \frac{100 \cdot q \cdot \Delta E}{E_M(100 - U_{\text{г}})} \quad \text{або} \quad \Delta q_M = \frac{100 \cdot q \cdot (E_{\text{ч}} - E_3)}{E_M(100 - U_{\text{г}})} . \quad (1)$$

Підкреслимо, що змінні E_M і $U_{\text{г}}$ у формулі (1) є випадковими величинами. Величини q і E_3 в кожному випадку доцільно приймати за умовно постійні, достовірність яких визначається точністю апаратури, що застосовується для їх контролю. Результати експрес-аналізу вмісту E_3 хімічних елементів у розплаві чавуну визначає напрям та обсяг коригування складу чавуну. Величина $E_{\text{ч}}$ необхідного вмісту конкретного елемента у складі чавуну спочатку задається. Вона є «точкою прицілювання» у процедурі корекції його хімічного складу.

Сутність рішення поставленої задачі, що пропонується, включає розрахунки величини Δq_M , передбачає використання методу Монте-Карло [4] і полягає в наступному. Потрібно знайти параметри розподілу величини Δq_M , яка фактично залежить від ряду випадкових змінних, перш за все від E_M та $U_{\text{г}}$. Математичне очікування M випадкової величини Δq_M дорівнює $M(\Delta q_M) = \Delta \bar{q}_M$. Тільдою над $\Delta \bar{q}_M$ та іншими

змінними q_{m_i} позначені їхні середні значення. В алгоритмі, що пропонується нижче, виконується n випробувань, в результаті яких отримують n можливих значень Δq_m . Далі розраховується їх середнє арифметичне $\Delta \bar{q}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta q_{m_i}$ і приймається $\Delta \bar{q}_m$

в якості оцінки наближеного значення шуканого числа Δq_m . Середнє квадратичне відхилення σ випадкової величини q_{m_i} від її середнього значення $\Delta \bar{q}_m$ розраховують за формулою:

$$\sigma \Delta q_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta q_{m_i} - \Delta \bar{q}_m)^2}.$$

У виробничій практиці, як правило, величину Δq_m – необхідна кількість додавання в розплав матеріалу, що містить хімічний елемент, якого не вистачає в чавуні, розраховують за формулою (1), підставляючи в неї середні значення з відомих або передбачуваних діапазонів величин E_m та U_g . За так звану «точку прицілювання», як правило, приймають середні значення діапазонів вмісту контрольованих хімічних елементів, регламентованих у стандарті. Тобто величину $E_{ч_{cp}}$, рівну $E_{ч_{cp}} = (E_{max} + E_{min}) / 2$, %, де E_{max} та E_{min} – максимальна та мінімальна величини процентного вмісту контрольованого елемента у складі готового чавуну. Тоді вираз в дужках у формулі (1) має вигляд $(E_{ч_{cp}} - E_3)$, де $E_3 = E_{замір}$ – виміряний безпосередньо під час плавки вміст

хімічних елементів, що контролюються. Підставляючи ці середні значення змінних у формулу (1), отримують орієнтовне середнє значення величини $\Delta \bar{q}_m$ кількості матеріалу, що містить у складі чавуну хімічний елемент, яке необхідно додати в розплав масою q .

На практиці після розчинення доданого матеріалу в розплав з нього зазвичай відбирають контрольну пробу і ще раз вимірюють вміст хімічних елементів у складі чавуну. Така процедура контролю та коригування хімічного складу розплавленого чавуну не гарантує стовідсоткове попадання в обумовлений стандартом його хімічний склад, оскільки при розрахунку Δq_m за формулою (1) використовують тільки середні значення величин E_m і U_g , але не враховують їх непостійність. Тобто не враховують параметри розподілів цих змінних, не враховують хоча б величини середніх квадратичних відхилень. Це безумовно знижує точність прогнозування кількості необхідного додавання в розплав матеріалу, що коректує вміст у чавуні елемента, який контролюється. При тому, що нинішній рівень комп'ютеризації ливарного виробництва на сучасних заводах, забезпечення його системами, що контролюють технологічний процес, дозволяє суттєво підвищити точність та надійність корекції хімічного складу металу безпосередньо під час його плавлення. Саме тому суть запропонованих ідеології та алгоритму полягає в тому, що для знаходження виду параметрів розподілу величини Δq_m за формулою (1) у функції середніх значень та ступеня розкиду значень вихідних змінних, зокрема випадкових величин E_m та U_g , застосували підхід, запропонований у книзі [5], відносно процесу виробництва листової сталі. Як інструмент використали метод статистичних випробувань (метод Монте-Карло) [4].

Відповідно до викладеної ідеології розрахунку Δq_m виконуються шляхом багаторазового повторення чисельного рішення при різних поєднаннях випадково вибраних величин E_m та U_g із сукупностей, що характеризують їх розподіл. В алгоритмі рішення величини E_m і U_g вважають випадковими і що ці величини відповідають нормальному закону розподілу. У базовому прикладі розмах варіювання величини E_m доцільно на першому етапі приймати рівним діапазону вмісту елемента, що розглядається в матеріалі, який застосовується для корекції його вмісту в розплав чавуну. А діапазон розподілу величини угару U_g приймати за даними виробничого

досвіду на конкретному промисловому об'єкті. Зокрема при виплавленні чавуну для виготовлення гальмових колодок типу «М» в 3-х тонній індукційній тигельній печі ливарного заводу ТОВ «М-ЛИТ» [6–7] на підставі виробничого досвіду приймати наступні величини угару елементів із присадок, що додаються в розплав безпосередньо у процесі плавки, %мас., кремній $\sim 2...3$, марганець $\sim 7...10$, вуглець $\sim 3...5$. В роботі [3] вказано приблизно удвічі більші величини угару зазначених елементів, але стосовно виплавлення сталей в індукційних електричних печах з основною футеровкою. Такий розрахунок не показує меж можливого розкиду відсоткового вмісту елемента E_q , що розглядається, в готовому чавуні при кількості Δq_M , доданого в розплав коригувального матеріалу і розташування цього розкиду відносно діапазону, регламентованому в стандарті на продукцію, яка виготовляється з чавуну. Тому доцільно викладену методику розрахунку добавки, що вноситься для коригування вмісту хімічного елемента у складі розплаву, розглядати та приймати як перше наближення i -того значення величини Δq_M серед можливих її значень Δq_{M_i} , де i – номер варіанта розрахунку Δq_{M_i} , $i = 1...n$; де n – кількість циклів розрахунків із змінної i .

Виробників завжди цікавить відповідь на запитання: яким буде діапазон розкиду можливих значень вмісту контрольованого елемента в чавуні при наявній мінливості вмісту цього елемента в матеріалі, який вони використовують для коригування хімічного складу розплаву? Тобто цікавить у першому наближенні при ($i = 1$) можливий діапазон ($E_{\min}...E_{\max}$) розмаху вмісту елемента, що розглядається, в чавуні після коригування його складу додаванням у розплав кількості Δq_{M_i} коригувального матеріалу за мінливості в ньому величини E_M , а також мінливості відсотка угару U_Γ цього елемента під час плавлення. Інакше висловлюючись, цікавить можливий діапазон $E_{\min}...E_{\max}$, одержуваний у першому ($i = 1$) наближенні при введенні у розплав кількості Δq_{M_i} коригувального матеріалу, розрахованого з використанням середніх значень $\bar{E}_M$ та $\bar{U}_\Gamma$.

Для оцінки величини цього діапазону ($E_{\min}...E_{\max}$) при $i = 1$ формулу (1) перетворимо (виразимо) відносно елемента, що контролюється, в готовому чавуні E_q . Отримуємо:

$$E_q = \frac{\Delta q_M E_M (100 - U_\Gamma)}{100q} + E_3. \quad (2)$$

Вважаючи при $i = 1$ величину постійною ($\Delta q_{M_{i=1}} = \text{Const}$) та незмінними значення q та E_3 , розрахуємо методом Монте-Карло [4] поле розподілу величин E_{qi} , при використанні, ймовірних значень E_M та U_Γ , випадково обраних з їх розподілів. Для реалізації такого підходу організуємо цикл обчислень за змінною j де $j = 1...K$. При цьому формула (2) набуває вигляду:

$$E_{qi,j} = \frac{\Delta q_{M_i} E_{M_{ij}} (100 - U_{\Gamma_{ij}})}{100q} + E_3. \quad (3)$$

При створенні циклу розрахунків E_{qi} за змінною j при $j = 1...K$, визначимо параметри розподілу (середнє значення $\bar{E}_{qi}$, середнє квадратичне відхилення σE_{qi} , розмах варіювання) цієї величини, де $E_{qi_{\max}} = \bar{E}_{qi} + 3\sigma E_{qi}$; $E_{qi_{\min}} = \bar{E}_{qi} - 3\sigma E_{qi}$. Відповідно при $i = 1$ діапазон варіювання величини E_{qi} від мінімального $E_{qi_{\min}}$ до максимального $E_{qi_{\max}}$ значень становить $6\sigma E_{qi}$. Порівнюємо цей розрахований діапазон з регламентованим стандартом діапазоном величини вмісту в чавуні елемента, що розглядається. Середнє, мінімальне та максимальне значення, розраховані у першому наближенні, але з урахуванням мінливості величин E_M та U_Γ у ймовірнісному аспекті, порівнюємо також з початковими значеннями цих змінних, прийнятими при розрахунку за формулою (1) орієнтовної величини Δq_M , без урахування непостійності

величин E_M та U_g . Таке порівняння дозволяє оцінити допустимість прийняття за основу розрахунку Δq_M в першому наближенні.

Варіюючи величинами середніх квадратичних відхилень у розподілах значень E_M і U_g , можна оцінити вплив мінливості цих величин, насамперед вмісту провідного елемента (наприклад марганцю або кремнію у феросплавах), на стабільність складу виплавленого чавуну. Процедура уточнення необхідної кількості Δq_M матеріалу, що вноситься в розплав для корекції вмісту в ньому конкретного елемента, не передбачає зупинятися в розрахунках на першому наближеному результаті визначення $\Delta q_{M,j=1}$. Заплановано продовження розв'язання поставленого завдання

до отримання заданої точності результату розрахунку величини Δq_M .

На наступному етапі порівнюються розраховані мінімальне, максимальне та середнє значення E_q з такими ж показниками вмісту контрольованого елемента, передбаченими в стандарті, оцінюється наскільки ці значення не збігаються і приймається рішення щодо необхідності подальшого уточнення результату розрахунків. Алгоритм спочатку передбачає, що діапазон розкиду величин вмісту конкретного елемента у складі чавуну менше такого діапазону в стандарті. Однак у принципі це припущення має бути обов'язково перевірено. Якщо діапазон ($E_{\max} \dots E_{\min}$), одержуваний в результаті розрахунку при $\Delta q_{M,j=1}$, ширше регламентованого в

стандарті діапазону, слід зробити висновок про суттєву нестабільність вмісту елемента, що розглядається, у складі матеріалу та непридатність його для коригування складу чавуну. Аналогічний результат свідчить і про неприпустимість прийнятої у розрахунках величини U_g угару контрольованого елемента під час плавки чавуну.

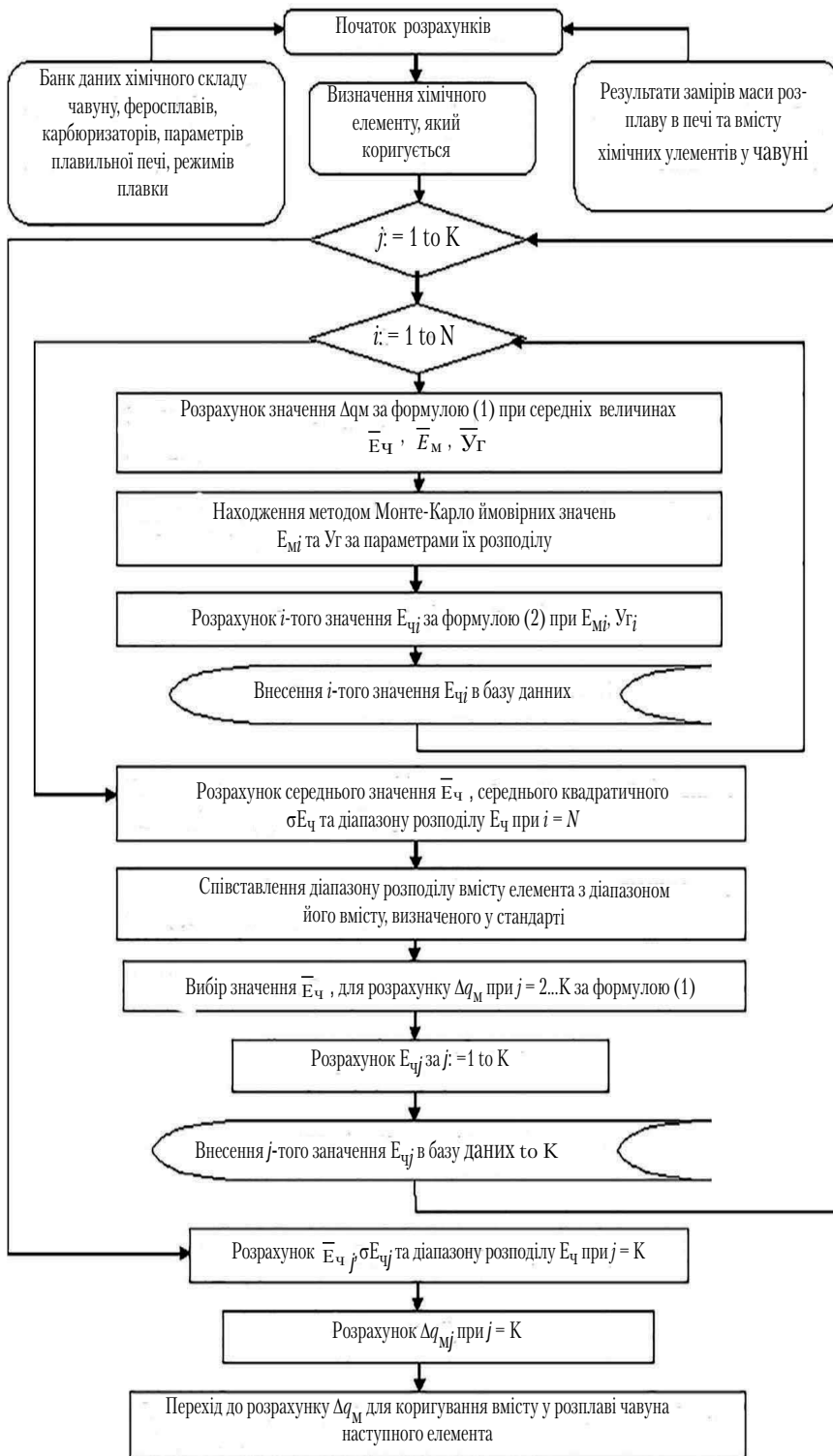
Знаючи відхилення $\Delta E_{q_{\min}} = (E_{q_{\min,j=1}} - E_{q_{\min}})$ і $\Delta E_{q_{\max}} = (E_{q_{\max}} - E_{q_{\max,j=1}})$, розрахо-

ваних мінімальної та максимальної величин E_q від зазначених у стандарті, можна зміщувати точку прицілювання величини E_q у формулі (1) ліворуч або праворуч залежно від поставленої мети. Зокрема, залежно від того, у бік більших або менших значень бажано змістити гістограму розподілу величини E_q у межах допустимого стандартом діапазону. Рішення в який бік (більших чи менших величин) і наскільки має бути зміщена точка прицілювання, приймається з різних міркувань. Наприклад, для економії матеріалу, який використовується при корекції хімічного складу чавуну, доцільно, щоб значення $E_{q_{\min,j}}$ збігалось з величиною $E_{q_{\min}}$ в стандарті. Відповідно, точка прицілювання, якою у формулі (1) служило середнє значення величини E_q в передбаченому стандартом діапазоні, повинна бути зміщена у бік більших або менших значень на величину $\Delta E_{q_{\min}}$. Відповідно при $j = 2$ змінюється розрахована за формулою (1) величина ΔE_M . Далі цикл розрахунку $E_{q_{i,j}}$ за формулою (3) повторюється, тепер вже при $\Delta q_{M,j=2}$, як і раніше для $j = 1 \dots K$. Цикли розрахунків за i та j

повторюються до досягнення заданої точності величини $E_{q_{i,j}}$. На рисунку представлено фрагмент блок-схеми викладеного алгоритму.

Завершивши цикли розрахунку необхідної кількості матеріалу, який має бути доданий в розплав для корекції вмісту в чавуні першого (домінуючого) елемента, приступаємо до процедури розрахунку за тією ж схемою обсягу добавки у розплав іншого матеріалу, який корегує вміст наступного хімічного елемента. При цьому, якщо визначена маса добавки Δq_M у розплаві матеріалу, що корегує вміст домінуючого елемента в чавуні, є істотною, порівняно з масою розплаву q , то в розрахунках за формулою (1) слід врахувати це збільшення маси розплаву і приймати його масу рівною $q' = q + \Delta q_M$.

В доповнення до викладеного слід додати, що при реалізації представленого алгоритму у виробництві на конкретному ливарному підприємстві доцільно і раціонально використовувати накопичений досвід виплавлення чавуну зазначеного сортаменту. Алгоритм дозволяє і підтримує таку можливість для підвищення



Фрагмент блок-схеми алгоритму розрахунку кількості легуючого матеріалу, необхідної для внесення у розплав чавуна при коригуванні його хімічного складу. Зміст позначень наведено в тексті статті

надійності результату розрахунків. Так, на першому етапі при розрахунку за формулою (1) величини Δq_m за «точки прицілювання» можна й доцільно приймати не середні значення діапазонів вмісту хімічних елементів, що контролюються, регламентованих у стандартах чи іншій нормативній документації, а значення вмісту елементів у складі чавуну відповідного сортаменту із бази даних цього заводу.

Запропонований алгоритм передбачає також враховувати ефект того, що внесення у розплав певного легуючого матеріалу для коригування конкретного хімічного елемента у складі чавуну може змінити вміст іншого елемента в розплаві. Наприклад, при додаванні у розплав сілікомарганцю при коригуванні вмісту кремнію одночасно зміниться й вміст марганцю в чавуні. Такий очікуваний вплив враховується спеціальною підпрограмою в алгоритмі, яка на рисунку не представлена.

Важливо підкреслити, що запропонований алгоритм опосередковано пов'язаний з режимами плавки чавуну. Зокрема спеціальна підпрограма розраховує залежність ступеня угару хімічних елементів у чавуні від температури та тривалості витримки розплаву. При необхідності враховується також ступінь засвоєння легуючого елемента при внесенні коригуючого матеріалу в розплав.

Нинішні можливості комп'ютерної техніки забезпечують миттєве виконання усієї викладеної процедури розрахунків кількості коригуючого матеріалу, який має бути внесений у розплав для досягнення необхідного вмісту конкретного елемента в чавуні.

Висновки

Розроблено алгоритм коригування хімічного складу розплаву чавуну безпосередньо під час його виплавлення в індукційних тигельних печах. Новизна і особливість алгоритму полягає в урахуванні нестабільності вмісту хімічних елементів у складі легуючих матеріалів (феросплавах тощо), які використовують для коригування складу чавуну. В алгоритмі застосовано метод Монте-Карло, а також використовуються бази даних щодо хімічного складу чавунів, феросплавів, карбюризаторів тощо, регламентовані у стандартах та технічних умовах на готову продукцію. Запропонований алгоритм передбачає можливість введення поняття коефіцієнтів вагомості кожного хімічного елемента у складі чавуну з розумінням його важливості для забезпечення необхідного рівня показників якості готових виробів. Для корекції складу чавуну рекомендується першочергово застосовувати той легуючий матеріал, який одночасно впливає на вміст двох чи більше хімічних елементів у розплаві. Напрями подальшого розвитку технології коригування чавуну передбачають поглиблення врахування в алгоритмі параметрів (температури, витримки розплаву тощо) процесу плавки.

Список літератури

- 1 Сіренко К. А., Мазур В. Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва. *Метал та лиття України*, 2021. Т. 29. № 4 (327). С. 44–54.
- 2 Тогобицкая Д. Н., Пиптюк В. П., Петров А. Ф., Греков С. В., Снигура И. Р., Лихачев Ю. М., Головкин Л. А. Базы данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали / В сб. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2017. Вып. 31. С. 150–165.
- 3 Ямшинський М. М. Жаростійкі та зносостійкі ливарні сплави на основі заліза для роботи в екстремальних умовах / Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Київ, ФТІМС НАН України, 2019. 510 с.
- 4 Соболев И. М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1978. 64 с.
- 5 Мазур В. Л., Воробей С. А., Романовский Д. Л., Чмелев А. А., Голубченко А. К., Свичинский А. Г. Надежность технологического процесса производства листового проката. Київ. Техніка, 1992. 170 с.
- 6 Попов Е. С., Шинский О. И. Анализ показателей качества колодок тормозных и композиционных для железнодорожного подвижного состава. *Литье и металлургия*. 2021. № 1. С. 27–37.

- 7 Мазур В. Л., Найдек В. Л., Попов Є. С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та литво України*. Vol. 29. 2021. № 2 (325). С. 80–89.

Надійшла 01.02.2022

References

- 1 Sirenko, K. A., Mazur, V. L. Ideology of adjustment of the chemical composition of synthetic cast iron in the manufacturing process of casting. *Metal and lytvo of Ukraine*, 2021. V. 29. No. 4 (327). P. 44–54 [in Ukrainian].
- 2 Togobitskaya, D. N., Piptyuk, V. P., Petrov, A. F., Grekov, S. V., Snigura, I. R., Likhachev, Yu. M., Golovko, L. A. Databases and models for expert assessment of the efficiency of using ferroalloys in steel production / In «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy», 2017. Vol. 31. P. 150–165 [in Russian].
- 3 Yamshynskyi, M. M. Heat resistant and wear resistant iron based casting alloys for work under extreme conditions. / The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Kyiv, 2019. Physico-technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, 510 p. [in Ukrainian].
- 4 Sobol, I. M. Monte Carlo method. M.: Nauka, 1978. 64 p. [in Russian].
- 5 Mazur, V. L., Vorobey, S. A., Romanovsky, D. L., Chmelev, A. A., Golubchenko, A. K., Svichinsky, A. G. Reliability of the technological process of production of sheet metal. Kiev. Technika, 1992. 170 p. [in Russian].
- 6 Popov, E. S., Shinsky, O. I. Analysis of quality indicators of brake and composite pads for railway rolling stock. *Casting and metallurgy*. 2021. No 1. P. 27–37 [in Russian].
- 7 Mazur, V. L., Naydek, V. L., Popov, E. S. Comparison of cast iron and compositional with iron insert brake pad inserts for railway rolling stock. *Metal and lytvo of Ukraine*. Vol. 29. 2021. No. 2 (325). P. 80–89 [in Ukrainian].

Received 01.02.2022

K. A. SIRENKO, Junior Researcher, e-mail: thermoexp.metal@gmail.com

ORCID 0000 0003 2613 8094

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF ADJUSTMENT OF CHEMICAL COMPOSITION OF IRON DURING MELTING IN CRUCIBLE INDUCTION FURNACES

The possibility of minimizing the duration of the procedure for correcting the chemical composition of the melt and ensuring its accuracy is shown. It was found that the greatest difficulties in ensuring the chemical composition of cast iron smelted in induction crucible furnaces are associated with significant instability of the chemical composition of scrap metal, ferroalloys and other materials used to correct the chemical composition of cast iron melt. The shortcomings of the known methods of regulating the chemical composition of cast iron. Proposed and substantiated approaches to improve the method of correction of the chemical composition of cast iron during smelting, which take into account the probable instability of materials added to the melt when adjusting the content of specific chemical elements based on rapid analysis of metal samples taken from the melt. The application of the Monte Carlo method in adjusting the content of chemical elements in cast iron to take into account the probabilistic estimates of the initial data on the stability of the properties of materials used to regulate the composition of cast iron. An algorithm for determining the required amount of alloying material for introduction into the melt when adjusting the content of a specific chemical element in the composition of cast iron. The rational sequence of decision-making in the procedure of calculating the amount of alloying material required for addition to the melt is recommended. The block diagram for realization of the specified ideology and algorithm is developed. Approaches to the definition of the «dominant» element and «target points» in the correction of the chemical composition of cast iron are proposed.

Keywords: cast iron, chemical composition, adjustment, melting, algorithm, improvement.

*The work was performed under the guidance of the corresponding member of the NAS of Ukraine V.L. Mazur, e-mail: prof.vlm@ukr.net.