

УДК 669.162.63

В. І. Єліссєв¹, к.ф.-м.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4999-8142

І.О. Маначин¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9795-6751

Л. С. Молчанов¹, к.т.н., зав. відділу, ORCID 0000-0001-6139-5956

В.Г. Кисляков¹, к.т.н., зав. відділу, ORCID 0000-0002-1775-5050

О. Л. Руденко¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-6068-9901

¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

МАТЕМАТИКО-АНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ І ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ МАГНІЄМ

Анотація. Метою роботи є математико-аналітична оцінка з використанням методів математичної статистики та сучасних комп'ютерних прикладних програм одиничного впливу температури, початкового та кінцевого вмісту сірки, глибини рідкої ванни та маси чавуну, маси ковшового шлаку, інтенсивності подачі магнію, витрати газоносія та вільного борту в ковші на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм. Виконана математико-статистична обробка фактичних даних, що характеризують процеси десульфурації доменного чавуну зернистим магнієм, забезпечила можливість більш обґрунтовано прогнозувати необхідні питомі витрати магнієвих реагентів у процесі розробки технологічної документації для створення нових комплексів десульфурації чавуну магнієм. Зіставлення отриманих результатів математико-статистичної обробки з результатами теоретичної оцінки впливу технологічних факторів і параметрів на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм дозволило оцінити наявність і потенційні можливості підвищення ефективності процесів десульфурації чавуну, що реалізуються в різних вихідних умовах. З метою вдосконалення технологічних процесів десульфурації чавуну магнієм рекомендовано контролювати та, при необхідності, коригувати хімічний склад та параметри ковшових шлаків для підвищення їх основності та сульфідної ємності. Показано доцільність, по мірі розширення скомп'юнованого банку фактичних даних, продовжити їх математико-статистичну обробку з метою уточнення одиничного впливу на ефективність процесу десульфурації чавуну вихідних умов та параметрів обробки.

Ключові слова: десульфурація, чавун, статистична обробка, ківш, шлак, міксер.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Посилання для цитування: Математико-аналітичний аналіз впливу технологічних факторів і параметрів на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм / В. І. Єлісєєв, І. О. Маначин, Л. С. Молчанов, В.Г. Кисляков, О. Л. Руденко // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 146-167. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-146-167>.

Стан питання. У світовій практиці сучасного конвертерного переділу, що характеризується зростанням обсягів виплавки сталей з низьким та особливо низьким вмістом сірки, широко використовується позапечна десульфурація чавуну, що забезпечує суттєве зниження витрат на виробництво високоякісної металопродукції.

Лідуюче положення, як реагент для десульфурації чавуну, займає металевий магній. За даними [1], на десульфурацію використовується 11% світового виробництва магнію – близько 100 тис. тонн на рік, що забезпечує виробництво понад 200 млн. тонн чавуну з низьким (0,010%) та особливо низьким (0,001 – 0,005%) вмістом сірки. Тому, вдосконаленням та розробкою нових ефективних і конкурентних технологічних процесів десульфурації чавуну магнієм, протягом останніх десятиліть активно займаються вітчизняні [2 - 8] та зарубіжні [9 - 11] вчені та металурги фірм «Thyssen Krupp», «Krupp Polisyus», «Danielli Corus», «ESM», «WISGAN» та ін.

Широке застосування в промисловій практиці отримала технологія десульфурації чавуну зернистим магнієм, що інжектуються в розплав без добавок, із застосуванням якої виробляється близько 100 млн. тонн/рік низькосірчистого і глибоко знесірченого чавуну [2 - 4]. Цей технологічний процес реалізований у ківшах із масою чавуну 30 – 300 тонн.

Вихідні умови застосування технології десульфурації чавуну зернистим магнієм коливаються в дуже широких межах. Так, температура чавуну, що подається на обробку, знаходиться в межах 1276-1480^oC, початковий вміст сірки становить 0,015 - 0,16%, кінцевий - 0,001-0,020%, глибина ванни рідкого чавуну - 1,4 - 4,4 м. У зв'язку з цим, необхідність досліджувати вплив кожного з цих факторів, а також параметрів обробки чавуну на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм є актуальним завданням.

До цього часу, при спорудженні нових комплексів десульфурації чавуну, технологічні показники, що забезпечують досягнення заданих результатів обробки, у т.ч. питомих витрат магнію та циклу обробки, визначаються на основі експертної оцінки фахівців та вимагають коригування після введення об'єктів у промислову експлуатацію.

Незважаючи на значний обсяг виконаних теоретичних досліджень з вивчення фізико-хімічних основ процесів десульфурації чавуну

магнієм [10-15], вивчення механізму взаємодії магнію з компонентами чавуну [16-24], а також результатів дослідно-промислових та промислових обробок [2-9], питання оцінки одиничного кількісного впливу технологічних факторів на ефективність десульфурації чавуну та використання магнію залишається не вирішеним та вимагають фундаментального вивчення.

Дослідження, проведені фахівцями Інституту чорної металургії НАНУ та спрямовані на оцінку одиничного кількісного впливу технологічних факторів та параметрів десульфурації чавуну на ефективність процесу десульфурації чавуну, виконувались у два етапи.

На першому етапі вплив вихідних технологічних факторів на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм визначали шляхом теоретичної оцінки, що базується на фізико-хімічних розрахунках. На основі отриманих результатів було показано:

- для всіх розглянутих температур чавуну (1276 – 1600 °С) термодинамічно найбільш пріоритетним механізмом десульфурації чавуну з застосуванням магнію є процес, що базується на взаємодії сірки розчиненої в металевій фазі з розчиненим магнієм, при цьому коефіцієнт впливу температури на процес з розчиненим магнієм дорівнює 0,047, а з пароподібним магнієм – 0,122;

- термодинамічно більш вірогідним для всіх розглянутих глибин занурення фурми (0 - 4 м) є процес десульфурації з розчиненням пароподібного магнію в рідкому чавуні, при цьому термодинамічно зберігається можливість для протікання реакції десульфурації з пароподібним магнієм;

- виконана теоретична кількісна оцінка впливу глибини занурення фурми на ефективність десульфурації чавуну (що базується на зміні енергії Гіббса та інженерних розрахунках) пароподібним магнієм та розчиненням пароподібного магнію в чавуні не виявила суттєвого впливу, глибини занурення на процес десульфурації;

- зниження вмісту сірки в розплаві на 0,001% з початкового 0,015% до кінцевого вмісту сірки в розплаві в діапазоні 0,002 - 0,005% призводить до зниження потенційної можливості протікання процесу десульфурації на ~5%, а в діапазоні 0,006 - 0,014% - у середньому на 11%;

- зниження вмісту сірки в розплаві на 0,001% з початкового в межах 0,03 – 0,06% до кінцевого в діапазоні 0,001 – 0,005% призводить до зниження потенційної можливості перебігу процесу десульфурації в межах 1,3 – 3,5%;

- збільшення початкової концентрації сірки на 0,01% призводить до підвищення ймовірності перебігу реакції через розчинений магній у межах 15 – 25%, а реакції через газоподібний магній у межах 9 – 19%;

- суттєвого впливу на процес десульфурації маси оброблюваного чавуну не виявлено.

На другому етапі досліджень вплив вихідних технологічних факторів і параметрів на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм визначали шляхом математико-аналітичного аналізу зібраної бази фактичних даних промислових обробок.

У цій статті наведено результати другого етапу досліджень.

Мета роботи. Математико-аналітична оцінка з використанням методів математичної статистики та сучасних комп'ютерних прикладних програм одиничного впливу температури, початкового та кінцевого вмісту сірки, глибини рідкої ванни та маси чавуну, маси ковшового шлаку, інтенсивності подачі магнію, витрати газозносія та вільного борту в ковші на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм.

Методика дослідження. Дослідження, на основі яких проводилася математико-аналітична оцінка одиничного впливу технологічних факторів та параметрів на ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм у ківшах з масою чавуну 30-300 тонн, базуються на 44 серіях контрольних обробок (1899 обробок). Контрольні обробки проводилися у промислових умовах на комплексах десульфурації чавуну (КДЧ) проектною потужністю 0,8 – 6,5 млн. т/рік. Технологічне обладнання КДЧ було оснащено інжекційними системами вдування магнію модулями-дозаторами з удосконаленою конструкцією роторних живильників та сучасними автоматизованими системами управління технологічним процесом.

Контрольні обробки проводилися відповідно до розробленої та діючої на підприємствах технологічної та технічної документації та інструкцій. Проведенню кожної серії контрольних обробок передував контроль стану технологічного обладнання системи інжектування реагентів, а також контрольна перевірка та тарування контрольно-вимірювальної апаратури КДЧ. Крім того, здійснювалася перевірка з використанням стандартних зразків похибки апаратури, на якій проводився аналіз проб чавуну в експрес-лабораторіях.

У процесі проведення контрольних обробок фіксувалися вихідні умови та технологічні параметри процесу обробки.

Вміст сірки в чавуні визначали в експрес-лабораторіях на спектрометрах та аналізаторах типу ARL 4460, 3460, CS 600, CS 200, LECO CS, LECO CS 230, 344, 2000, HCS 140 (Шанхай), MXF 2400 MXG 2400, LAVFCORA (Кельн), WF - L 88. Для налаштування приладів використовувалися стандартні зразки із вмістом сірки в межах 0,002 – 0,050%, що відповідає рівню сірки в аналізованих

пробах чавуну. Оцінка похибки аналізу проб чавуну проводилася за результатами трьох вимірювань вмісту сірки в пробах поточного виробництва шляхом усереднення виявлених відхилень від стандартної проби. Похибка аналізу становила в залежності від рівня вмісту сірки: $0,002\% \pm 0,0002\%$; $0,005\% \pm 0,0004\%$; $0,012\% \pm 0,001\%$; $0,050\% \pm 0,003\%$.

Для відбору проб чавуну на експрес-аналіз вмісту в них сірки, використовувалися одноразові змінні блоки типу KQY -07/1200, та TP Sampler виробництва Yi Sheng Enterpris Co LTD (Caoxing, Tajwan).

Проби чавуну, що відбиралися, були досить щільними, не мали порожнин і раковин, але на поверхні частини проб були неметалеві включення, спайки, мікрораковини, які видалялися механічним шляхом при підготовці проб до аналізу.

Маса чавуну в ковші ($G_{\text{ч}}$, т) розраховувалася по різниці маси ковша з чавуном, що визначається за показниками тензовесів електромостового крану (похибка зважування $0,5\%$), і маси порожнього ковша плюс усереднена маса залишків шлаку ковшового, прийнята на комбінаті.

Кількість шлаку в ковші оцінювалася виходячи із виміру щупом його товщини, з урахуванням внутрішнього діаметра ковша і маси чавуну в ковші, за формулою:

$$q_{\text{шл.}} = \frac{78,5 \times D^2 \times h_{\text{шл.}} \times \gamma_{\text{шл.}}}{G_{\text{ч}}}, \quad \%, \quad (1)$$

де D – внутрішній діаметр ковша, м; $h_{\text{шл.}}$ - товщина шару шлаку, м; $\gamma_{\text{шл.}}$ – питома щільність шлаку, т/м^3 ; $G_{\text{ч}}$ - маса чавуну в ковші, т.

Температура чавуну до ($T_{\text{вих.}}^0 \text{ C}$) і після ($T_{\text{кін.}}^0 \text{ C}$) обробки визначалася пристроями вимірювання температури DIGITEMP-E (завод-виробник HERAEUS ELECTRO-NITE, Німеччина) з використанням для занурення одноразових блоків в чавун автоматизованих пристроїв. Для оцінки швидкості зниження температури ($^{\circ}\text{C/хв}$) фіксувався час між вимірами.

Під час проведення контрольних обробок використовувалися магнієві реагенти наступних типів:

- гранульований магній із сольовою оболонкою, виготовлений з первинного магнію методом відцентрового розбризкування;
- фрезерований магній із захисним покриттям.

Зернисті магнієві реагенти поставлялися в 1-тонних контейнерах типу «біг-бег» з герметизацією за рахунок затарювання реагенту в два поліетиленові мішки. Перед завантаженням реагенту в технологічні ємності контролювалася цілісність тари. Крім того, перед проведенням кожної серії контрольних обробок проводився перевірочний аналіз

відібраної представницької проби магнієвого реагенту на вміст активного магнію (металевого) в реагенті. У разі виявлення відхилень (у більшу чи меншу сторону) від величин вмісту магнію, зазначених у сертифікаті, у розрахунки необхідних питомих витрат реагенту на обробку закладалася уточнена величина вмісту активного магнію в реагенті, яка також враховувалася при визначенні фактичних показників процесу десульфурації чавуну магнієм.

Витрата зернистого магнію на ківш розраховувалася по різниці показань пристроїв вимірювання ваги модулів-дозаторів, що фіксуються до початку і після завершення обробки, коли тиск у бункері дорівнював «0» МПА. У комплект вимірювальних елементів пристроїв вимірювання ваги входило три тензотричні силувимірювальні датчики типу МР79Т/1134. Відповідно до технічної характеристики цих пристроїв, їх припустима похибка не перевищує 0,5%. Фактична похибка, що визначається при таруванні пристроїв стандартними 20 кг гириями (або при видачі з бункера модуля-дозатора порції магнію 50-150 кг), знаходилася в межах 0 - 0,2%.

Глибина занурення фурми в розплав (H_{ϕ} , м) визначалася після закінчення обробки чавуну по межі нагрівання футерування фурми за допомогою мірної лінійки.

При математико-статистичній обробці експериментальних даних, ефективність процесу десульфурації чавуну магнієм оцінювалася за необхідними питомими витратами магнію (q_{Mg} , кг/т) і ступеня використання магнію на сірку віддалену ($K_{Mg}^S = \Delta S \cdot 0,76 \cdot 100 / q_{Mg} \cdot 0,1$, %).

До завдань математико-статистичної обробки експериментальних даних входило визначення математичного виду досліджуваних залежностей:

$$q_{Mg} = f([S]_{вих.}, [S]_{кін.}, T_{вих.}^0 C, C_{\phi}, H_{\phi}, I_{реак}, W_{\Gamma}, M_{шл}), \text{ кг/т}$$
$$K_{Mg}^S = f([S]_{вих.}, [S]_{кін.}, T_{вих.}^0 C, C_{\phi}, H_{\phi}, I_{реак}, W_{\Gamma}, M_{шл}), \text{ \%}. \quad (2)$$

Аналіз експериментальних даних при математико-статистичній обробці проводився у кілька послідовних етапів.

Первинна статистична обробка результатів десульфурації чавуну магнієм передбачала визначення характеру розподілу досліджуваних залежностей. Про нормальність розподілу досліджуваних залежностей робили висновки, виходячи із співвідношення абсолютних значень показників ексцесу (E) та асиметрії (A), з їх помилками відповідно (m_A і m_E). При цьому, досліджувані залежності вважалися нормально розподіленими при виконанні наступних рівностей [25]:

$$\begin{cases} |A| < 3 \cdot m_A \\ |E| < 3 \cdot m_E \end{cases} \quad (3)$$

Виходячи з обмеженої кількості даних у масивах, було прийнято припущення про достатність виконання хоча б однієї з рівностей. У разі невідповідності цільової функції закону нормального розподілу експериментальних даних проводилося експертне відсіювання даних з масиву з метою приведення масиву до нормального або умовно-нормального вигляду.

Обов'язковою операцією первинної статистичної обробки експериментальних даних було вилучення із досліджуваних масивів технологічно необґрунтованих даних, грубих та випадкових відхилень. Ця операція здійснювалася за критерієм входження досліджуваного параметра довірчий інтервал ($x_{cp} \pm 3\sigma$) [26].

Математико-статистична обробка досліджуваного масиву даних проводилася з розбивкою по масі чавуну: 50±15т, 80±10т, 100±10т, 130±10т, 150±7т, 180±20т, 265±20т.

Враховуючи різні фізико-хімічні умови процесів десульфурації чавуну магнієм залежно від кінцевого вмісту сірки в розплаві, масив даних, згрупованих за масою чавуну, було розкладено на серії кінцевого вмісту сірки в чавуні (0,002 ± 0,001%; 0,005 ± 0,002%; 0,015±0,002%; 0,020±0,002%).

З метою виявлення найбільш значущих технологічних факторів, що визначають ефективність процесу десульфурації, проводився регресійний та кореляційний аналізи. Виявлення кореляційних взаємозв'язків питомої витрати магнію та ступеня використання магнію на сірку з технологічними параметрами та факторами проводилося за допомогою надбудови «Аналіз даних» програми Microsoft Excel.

У процесі аналізу отриманих коефіцієнтів множинної лінійної регресії експертним шляхом з подальшої обробки були виключені коефіцієнти, що не відображають фізичний зміст процесу десульфурації рідкого чавуну моноінжекцією металевого магнію, а також ненормально великі та малі коефіцієнти (що на порядок відрізняються від найчастіше, що зустрічається за даним параметром).

При дослідженні ефективності процесів позапічної десульфурації чавуну магнієвими реагентами також визначали середньозважені значення коефіцієнтів множинної регресії залежності K_{Mg}^S від технологічних факторів та параметрів аналогічно з питомою витратою магнію.

Для коректного зіставлення ефективності досліджуваних технологічних процесів десульфурації чавуну магнієм, що

відрізняються за вихідними умовами та параметрами обробки, застосовували наведений ступінь засвоєння магнію чавуном на видалену сірку:

$$K_{Mg}^{S \text{ прив.}} = K_{Mg}^{S \text{ факт}} + ([S]_{\text{вих. ср.зваж.}} - [S]_{\text{вих.факт.}}) \times K_1 + ([S]_{\text{кін.ср.зваж.}} - [S]_{\text{кін.факт.}}) \times K_2 - (T_{\text{вих.ср.зваж.}} - T_{\text{вих.факт.}}) \times K_3 - (H_{\text{ф.ср.зваж.}} - H_{\text{ф.факт.}} + (I_{\text{реаг.ср.зваж.}} - I_{\text{реаг.факт.}}) \times K_6 + (M_{\text{шл порівн.зваж.}}) \cdot \% \quad (4)$$

де $K_{Mg}^{S \text{ факт}}$ - фактичний ступінь засвоєння магнію чавуном на видалену сірку, %;

$[S]_{\text{вих.факт.}}$ - фактичний вихідний вміст сірки в чавуні, %;

$[S]_{\text{вих. порівн.}}$ - середньозважений вихідний вміст сірки в чавуні, %;

$[S]_{\text{кін.факт.}}$ - фактичний кінцевий вміст сірки в чавуні, %;

$[S]_{\text{кін. порівн.}}$ - середньозважений кінцевий вміст сірки в чавуні, %;

$T_{\text{вих.факт.}}$ - фактична температура чавуну до обробки, °C;

$T_{\text{вих.ср.зваж.}}$ - середньозважена температура чавуну до обробки, °C;

$H_{\text{ф.факт.}}$ - фактична глибина занурення фурми в чавун, м;

$H_{\text{ф.порівн.}}$ - середньозважена глибина занурення фурми в чавун, м;

$G_{\text{ч.факт.}}$ - фактична маса чавуну, т;

$G_{\text{ч.зваж.}}$ - середньозважена маса чавуну, т;

$I_{\text{реаг.факт.}}$ - фактична інтенсивність подачі магнію в чавун, кг/хв;

$I_{\text{реаг.зваж.}}$ - середньозважена інтенсивність подачі магнію в чавун, кг/хв;

$M_{\text{шл.факт.}}$ - фактична кількість ковшового шлаку, %;

$M_{\text{шл порівн.зваж.}}$ - середньозважена кількість ковшового шлаку, %;

K_1 - коефіцієнт впливу зміни вихідного вмісту сірки в чавуні на кожні 0,001% на коефіцієнт засвоєння магнію $\frac{\%}{0,001\%}$;

K_2 - коефіцієнт впливу зміни кінцевого вмісту сірки в чавуні на кожні 0,001% на коефіцієнт засвоєння магнію $\frac{\%}{0,001\%}$;

K_3 - коефіцієнт впливу зміни вихідної температури чавуну на кожен 10 на коефіцієнт засвоєння магнію, $\frac{\%}{1 \text{ C}}$;

K_4 - коефіцієнт впливу зміни глибини занурення фурми в чавун на кожні 0,1 м коефіцієнт засвоєння магнію, $\frac{\%}{0,1 \text{ м}}$;

K_5 - коефіцієнт впливу зміни маси чавуну на кожну 1 т на коефіцієнт засвоєння магнію $\frac{\%}{1 \text{ т}}$;

K_6 - коефіцієнт впливу зміни інтенсивності введення магнію в розплав на кожен 1 кг/хв на коефіцієнт засвоєння магнію $\frac{\%}{1 \text{ кг/мин}}$;

K_7 - коефіцієнт впливу зміни витрати газоносія на кожні 10 м³/год на коефіцієнт засвоєння магнію $\frac{\%}{10 \text{ м}^3 / \text{ч}}$;

K_8 - коефіцієнт впливу зміни кількості ковшового шлаку на кожен 1%

на коефіцієнт засвоєння магнію $\frac{\%}{1\%}$;

Результати дослідження. Результати первинної статистичної обробки масивів даних щодо аналізованих контрольних обробок наведено в таблиці 1.

Виконана перевірка гіпотези про нормальність розподілу даних масивів, що зазнають статистичного аналізу, показала, що частина масивів за характером нормальності розподілу питомої витрати магнію на обробку, а також за низкою досліджуваних параметрів, не відповідають вимогам статистичної обробки: Циндао 1 , Дачжоу , Тяньзін-Лянхе 1 і 2, Ухань 2, Баото , Чуаньянь , Жічжао 2, Тонгхуа 2 .

Проведена обробка даних за вищезазначеними масивами, що не відповідають нормальності розподілу, та аналізу їх на предмет можливості приведення до нормального вигляду відповідно до прийнятої методики не дозволили привести до нормального або умовно-нормального виду масиви: Тяньзін – Лянхе 2, Ухань 2, Баото .

Отримані для кожного з масивів усереднені значення коефіцієнтів регресії, що відображають вплив кожного з досліджуваних факторів і параметрів на питому витрату магнію, наведені в таблиці 2, а на ступінь використання магнію - таблиці 3.

Наведені в таблицях 2 і 3 середньозважені значення коефіцієнтів лінійної регресії дозволили встановити та оцінити для кожного фактора та параметра, що входять у модель, їх незалежний вплив на питому витрату магнію та на ступінь використання магнію. Отримані результати впливу технологічних факторів та параметрів на питому витрату магнію та ступінь використання магнію при обробці чавуну у ківшах різного типорозміру наведено у таблиці 4.

Можливими причинами виявлених значних коливань впливу кожного з досліджуваних факторів на питому витрату магнію та на ступінь використання магнію при десульфуратції чавуну моноінжекцією магнію в ківшах різної ємності можуть бути:

- широкий спектр вихідних умов;
- вплив на процес низки факторів, що не враховуються, у т.ч. основності та сульфідної ємності ковшових шлаків;
- недостатня кількість даних для математико-статистичної обробки.

Тому отримані величини залежностей впливу кожного з досліджуваних факторів на питому витрату та на ступінь використання магнію на сірку віддалену доцільно уточнювати в міру розширення скомпанованого банку даних.

Таблиця 1 – Результати первинної статистичної обробки даних щодо контрольних обробок. Фактична та наведена ступінь використання магнію на сірку

№ з/п	Назва масиви	Кількість розплавів і характер розливу, шт.	Φ _{Fe} , кг/т	Досліджувані параметри							M _{max} , %
				[S] _н , %	[S] _{до} , %	T _{вип} , °C	G _{сод} , т	H _ф , м	Γ _{вир} , кг/хв	W _т , мм ³ /год	
Масив 50±15 т											
1	Тангань 1	40 32 ср	0.25-0.93 0.45	0.013-0.079 0.033	0.002-0.015 0.0073	1217-1364 1302	34-50 39.2	1.65-1.95 1.8	4,5	35	1.0-4.6 2.4
2	Циндао	100 58 ср	0.28-0.8 0.56	0.022-0.085 0.044	0.0007-0.035 0.014	1276-1359 1326	36-62.9 51.3	1.5-1.9 1.7	3.3-6.5 5.1	30-47 36.9	0.8-6.7 3.7
3	Юаньлі	34 16 ср	0.51-0.82 0.64	0.019-0.063 0.033	0.001-0.014 0.006	1248-1350 1313	42-50 47.8	1.6-1.8 1.7	4,0	35-45	н / д
4	Жічжао старий	23 16 ср	0.36-0.78 0.6	0.017-0.044 0.029	0.003-0.009 0.006	1263-1356 1299	50-63 55.4	1.8-2.3 1.8	4-5 4.5	40	0.5-5.1 1.8
5	Дачжоу	38 14 ср	0.69-0.96 0.82	0.020-0.074 0.047	0.0008-0.014 0.0054	1276-1378 1313	44.7-53.1 48.8	1.5-2.2 1.9	5.2-7.0 5.9	45	1.2-2.5 1.8
6	Дзіньсі	20 15 ср	0.3-0.6 0.4	0.010-0.039 0.022	0.001-0.020 0.007	1311-1349 1328	50-55 54	1.9-2.3 2.1	3-4 3.7	40	1-10.3 3.7
7	Ланьлюейцзяо	40 22 ср	0.4-0.8 0.6	0.017-0.059 0.035	0.006-0.014 0.009	1267-1383 1329	51-72 64	1.6-2.2 1.9	4-7 5.8	40	1-4.4 2.3
8	Нанчань	40 16 ср	0.3-0.5 0.4	0.006-0.033 0.017	0.002-0.011 0.004	1270-1399 1341	57-67 61.4	1.9-2.3 2.1	3-6 3.7	40-50	3.3-5.5 3.7
9	Линьюань1	20 18 ср	0.29-0.82 0.56	0.019-0.050 0.031	0.002-0.012 0.0055	1284-1367 1321	48-63 53	1.6-2.3 1.9	6-8 6.8	40	0.5-2.6 1.5
10	Линьюань2	33 33 ср	0.3-0.7 0.53	0.014-0.044 0.029	0.001-0.015 0.0053	1307-1363 1358	36-58 47.2	1.4-2.0 1.8	4-6.8 5.5	35	2.1-3.2 2.6
11	Сінін	17 17 ср	0.3-1.0 0.58	0.015-0.092 0.040	0.005-0.014 0.0076	1259-1353 1308	53-66 62.2	1.7-2.0 1.8	6-8 6.8	40	1.1-3.2 2.1

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Масив 80±10 т											
12	Снягмін 1	$\frac{86}{83 \text{ ср}}$	$\frac{0.24-0.83}{0.45}$	$\frac{0.016-0.071}{0.035}$	$\frac{0.003-0.024}{0.0106}$	$\frac{1268-1373}{1329}$	$\frac{71.6-90.0}{77.0}$	$\frac{1.9-2.8}{2.15}$	$\frac{5.0-7.5}{6.1}$	$\frac{45-109}{70}$	$\frac{0.16-2.4}{0.96}$
13	Ціндао	$\frac{22}{21 \text{ ср}}$	$\frac{0.30-0.60}{0.4}$	$\frac{0.017-0.040}{0.0285}$	$\frac{0.003-0.007}{0.008}$	$\frac{1290-1338}{1311}$	$\frac{79.0-89.5}{83.0}$	$\frac{1.9-2.3}{2.1}$	$\frac{7-8}{7.5}$	$\frac{40-45}{45}$	$\frac{1.0-2.9}{1.6}$
14	Тайгоань 1	$\frac{61}{59 \text{ ср}}$	$\frac{0.22-0.98}{0.47}$	$\frac{0.013-0.051}{0.031}$	$\frac{0.001-0.015}{0.0056}$	$\frac{1289-1368}{1335}$	$\frac{69.92}{80.8}$	$\frac{1.9-2.1}{1.9-2.1}$	$\frac{4.5-5.5}{4.5-5.5}$	N_2	н / д
15	Тайгоань 2	$\frac{48}{48 \text{ ср}}$	$\frac{0.3-0.95}{0.46}$	$\frac{0.015-0.061}{0.030}$	$\frac{0.0019-0.008}{0.006}$	$\frac{1273-1390}{1351}$	$\frac{51-85}{81.1}$	н / д	$\frac{6-8}{6-8}$	Ar	$\frac{0.5-3.5}{0.5-3.5}$
16	Сяньгань 1	$\frac{18}{18 \text{ ср}}$	$\frac{0.18-0.51}{0.36}$	$\frac{0.014-0.035}{0.024}$	$\frac{0.0036-0.011}{0.0057}$	$\frac{1257-1348}{1295}$	$\frac{74.3-81.0}{77.5}$	н / д	$\frac{6-7}{6-7}$	$\frac{50-60}{50-60}$	$\frac{0.8-2.5}{1.7}$
17	Хуаньган	$\frac{25}{25 \text{ ср}}$	$\frac{0.19-0.61}{0.46}$	$\frac{0.014-0.056}{0.032}$	$\frac{0.003-0.011}{0.0049}$	$\frac{1260-1425}{1324}$	$\frac{76.3-93.2}{87.6}$	$\frac{2.1-2.6}{2.3}$	$\frac{5-6}{5-6}$	$\frac{60}{60}$	$\frac{1.1-2.8}{1.65}$
Масив 100±10 т											
18	Тяньцзінь	$\frac{17}{17 \text{ ср}}$	$\frac{0.23-0.67}{0.52}$	$\frac{0.026-0.060}{0.041}$	$\frac{0.004-0.010}{0.006}$	$\frac{1302-1391}{1345}$	$\frac{92.0-98.0}{95.7}$	$\frac{2.2-2.4}{2.3}$	$\frac{6.0-7.1}{6.8}$	$\frac{40}{40}$	$\frac{0.60-2.90}{1.88}$
19	Ціндао 1	$\frac{35}{35 \text{ ср}}$	$\frac{0.22-0.89}{0.51}$	$\frac{0.004-0.101}{0.043}$	$\frac{0.001-0.040}{0.006}$	$\frac{1314-1438}{1397}$	$\frac{100-109}{102.3}$	$\frac{2.4-2.8}{2.6}$	$\frac{4.0-6.5}{4.4}$	$\frac{50-110}{62}$	$\frac{0.85-6.18}{3.24}$
20	Ціндао 2	$\frac{40}{36 \text{ ср}}$	$\frac{0.36-0.77}{0.62}$	$\frac{0.023-0.089}{0.041}$	$\frac{0.001-0.008}{0.003}$	$\frac{1307-1450}{1381}$	$\frac{101-101}{101.0}$	$\frac{2.6-2.7}{2.7}$	$\frac{5.0-8.0}{6.9}$	$\frac{95-115}{111}$	$\frac{0.95-4.75}{2.38}$
21	Люджоу	$\frac{19}{19 \text{ ср}}$	$\frac{0.30-0.41}{0.35}$	$\frac{0.014-0.054}{0.030}$	$\frac{0.001-0.018}{0.010}$	$\frac{1295-1355}{1320}$	$\frac{98.0-108.0}{102.9}$	$\frac{2.5-3.0}{2.7}$	$\frac{6.0-8.0}{7.1}$	$\frac{40}{40}$	$\frac{0.25-1.89}{1.01}$
22	Хандан	$\frac{27}{27 \text{ ср}}$	$\frac{0.25-0.57}{0.39}$	$\frac{0.014-0.053}{0.026}$	$\frac{0.003-0.012}{0.006}$	$\frac{1288-1397}{1334}$	$\frac{100-114}{106.1}$	$\frac{2.0-2.5}{2.4}$	$\frac{6.4-9.0}{8.1}$	$\frac{30-60}{47}$	$\frac{0.70-3.00}{1.65}$
23	Сяньмінь 2	$\frac{17}{17 \text{ ср}}$	$\frac{0.30-0.44}{0.39}$	$\frac{0.012-0.042}{0.024}$	$\frac{0.002-0.014}{0.007}$	$\frac{1235-1338}{1303}$	$\frac{104.6-111.7}{107.7}$	$\frac{2.9-3.1}{3.0}$	-	-	$\frac{0.97-1.46}{1.23}$
24	Тяньцзінь – Лянхе 1	$\frac{22}{22 \text{ ср}}$	$\frac{0.28-0.39}{0.34}$	$\frac{0.010-0.030}{0.020}$	$\frac{0.001-0.005}{0.003}$	$\frac{1280-1458}{1353}$	$\frac{90.0-104}{98}$	$\frac{2.5-2.8}{2.6}$	$\frac{7-8}{7.9}$	$\frac{50-65}{56}$	$\frac{0.6-4.0}{1.6}$

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25	Тяньзінь-Лянхе2	22ср	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	Ухань 1	84	0,29-0,95	0,015-0,053	0,001-0,012	1175-1383	100-111	2,0-2,3	4 - 12,3	45-55	-
	Ухань 2	84 ср	0,50	0,031	0,003	1287	103	2,15	7,2	50	-
27	Ухань 2	210 нер	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	Баото	33нер	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Масив 130±13 т											
29	Гоуфен	49	0,26-0,70	0,015-0,050	0,002-0,015	1263-1386	114-125,3	2,4-2,8	6,0 - 8,5	50-60	0,8-5,3
		48 ср	0,40	0,029	0,006	1330	118,8	2,6	7,5	55	1,7
30	Сяньтан 2	18	0,29-0,48	0,013-0,037	0,003-0,010	1274-1375	124-130	2,6-3,15	5,0 - 8,0	55-80	1,5-3,8
		18 ср	0,4	0,027	0,005	1307	126	2,76	7,4	60	2,3
31	Чуаньянь	41	0,21-0,54	0,012-0,055	0,004-0,018	1367-1405	126-137	2,9-3,3	5,0 - 14,0	90-90	0,7-2,8
		16 ср	0,33	0,025	0,009	1389	132	3,1	8,6	90	1,3
32	Жігжао	42 ср	0,15-0,39	0,011-0,040	0,003-0,018	1322-1374	105-133	2,6-3,1	5,0 - 7,5	нд	0,6-2,9
			0,26	0,025	0,008	1345	119,7	2,9	6,4		1,4
33	Тонгхуа 1	70	0,17-0,95	0,013-0,058	0,001-0,015	1233-1409	126-150	2,7-3,5	5,0 - 8,0	100-130	0,4-1,75
		65 ср	0,48	0,031	0,005	1299	135	3,1	6,6	125	0,86
34	Тонгхуа 2	27	0,2-0,9	0,015-0,053	0,003-0,013	1291-1409	131-156	2,9-3,5	6,0 - 9,0	75-115	1,0-4,4
		13ср	0,4	0,032	0,007	1339	143	3,1	7,0	110	3,0
Масив 143±7 т											
35	Ділінь	15	0,2-0,6	0,012-0,035	0,004-0,015	1279-1385	145-145	2,9-3,8	11,0 - 16,0	100-120	1,6-3,8
		13 ср	0,40	0,023	0,008	1340	145	3,4	14,0	115	2,4
36	Тангшань 2	7	0,23-0,48	0,028-0,047	0,004-0,020	1296-1357	151-157	2,9-3,35	3,5 - 7,5	120-145	3,0-4,5
		7 ср	0,4	0,038	0,009	1328	155	3,0	6,2	140	3,5
Масив 180±20 т											
37	Тайоань 3	115	0,1-1,0	0,046-0,057	0,001-0,013	1295-1417	174-185	3,4-3,7	7,0 - 8,5	135-140	0,6-1,5
		100 ср	0,40	0,026	0,0056	1358	180	3,5	8,1	132	1,0
38	92Шаган	29	0,2-0,5	0,006-0,031	0,001-0,013	1278-1423	175-179	3,2-3,5	5,0 - 10,0	100-150	0,5-1,4
		26 ср	0,3	0,016	0,0035	1338	178	3,3	7,1	115	0,78

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
39	Пекин	$\frac{55}{54 \text{ ср}}$	$\frac{0,16-0,42}{0,25}$	$\frac{0,014-0,049}{0,027}$	$\frac{0,003-0,022}{0,0089}$	$\frac{1293-1396}{1348}$	$\frac{180-207}{195}$	$\frac{2,8-3,0}{2,9}$	$\frac{7,0-8,0}{7,5}$	$\frac{100-170}{160}$	$\frac{0,3-2,8}{1,4}$
40	Цяньян 1	$\frac{23}{21 \text{ ср}}$	$\frac{0,23-0,44}{0,36}$	$\frac{0,022-0,045}{0,031}$	$\frac{0,0046-0,017}{0,0074}$	$\frac{1313-1389}{1352}$	$\frac{205-223}{214 \pm 13}$	$\frac{2,8-3,15}{3,0}$	$\frac{8,0-8,5}{8,4}$	$\frac{170-180}{175}$	$\frac{0,8-2,2}{1,3}$
41	Цяньян 2	$\frac{30}{29 \text{ ср}}$	$\frac{0,17-0,87}{0,44}$	$\frac{0,021-0,069}{0,042}$	$\frac{0,003-0,020}{0,0096}$	$\frac{1230-1344}{1295}$	$\frac{192-198}{196}$	$\frac{2,6-3,0}{2,8}$	$\frac{8,5-10,0}{8,51}$	$\frac{125-140}{135}$	$\frac{0,2-2,4}{1,1}$
42	Цяньян 3	$\frac{13}{11 \text{ ср}}$	$\frac{0,26-0,49}{0,36}$	$\frac{0,018-0,039}{0,028}$	$\frac{0,005-0,005}{0,005}$	$\frac{1315-1379}{1337}$	$\frac{198-202}{201}$	$\frac{3,0-3,3}{3,1}$	$\frac{8,0-9,5}{8,5}$	$\frac{135-150}{148}$	$\frac{0,6-5,1}{1,3}$
Масив 265±20 т											
43	Тайвань	$\frac{108}{95 \text{ ср}}$	$\frac{0,25-0,66}{0,43}$	$\frac{0,015-0,045}{0,026}$	$\frac{0,002-0,005}{0,0026}$	$\frac{1252-1406}{1328}$	$\frac{246-275}{258}$	$\frac{3,4-4,2}{3,8}$	$\frac{15,0-25,0}{16,0}$	$\frac{135-160}{140}$	$\frac{0,6-1,5}{1,0}$
44	Ухань 3	$\frac{11}{11 \text{ ср}}$	$\frac{0,2-0,4}{0,3}$	$\frac{0,010-0,051}{0,022}$	$\frac{0,001-0,0083}{0,0039}$	$\frac{1288-1366}{1322}$	$\frac{245-250}{248}$	$\frac{3,9-4,1}{4,0}$	$\frac{11,0-12,0}{11,5}$	$\frac{165-190}{175}$	$\frac{0,4-4,6}{2,0}$
45	Ухань 4	$\frac{13}{12 \text{ ср}}$	$\frac{0,3-0,7}{0,4}$	$\frac{0,014-0,034}{0,025}$	$\frac{0,001-0,010}{0,0034}$	$\frac{1255-1382}{1334}$	$\frac{273-280}{276}$	$\frac{3,9-4,1}{4,0}$	$\frac{11,0-12,0}{11,5}$	$\frac{165-190}{175}$	$\frac{0,4-4,6}{2,0}$

* чисельник - загальна кількість даних; знаменник - кількість даних після відсіювання;

** чисельник - X_{\max} ; знаменник - X порівн ± 3σ;

*** НР - нормально розподілений;

**** ненр - ненормально розподілений.

Таблиця 2 – Середньозважені коефіцієнти множинної лінійної регресії рівняння

$$q_{Mg} = a \cdot G_{чуг} + b \cdot S_{поя} + c \cdot S_{кин} + d \cdot T_{чуг} + e \cdot H_{ф} + f \cdot I_{pear} + g \cdot W_{г} + h \cdot M_{шп}$$

№	Масив	Кіл-ть дан.	G _{чуг} , т	T _{чуг} , °C	S _{поя} , %	S _{кин} , %	H _ф , м	M _{шп} , %	I _{mg} , кг/ХВ	W _г , М ³ /ГОД	H _{св} , мм	R ²
1	50±15 т	225	-0,01186	0,000634	8,932773	-10,5332	-0,21649	0,019176	0,09788	-	-	0,980
2	80±10т	187	-0,0106231	0,000533	6,8589	-22,0450	-0,1677	0,01641	0,038173	0,000423	-0,00303	0,963
3	100±10т	151	-0,007796	0,00007	6,265514	-15,8366	-0,06293	0,03484	0,093134	0,022349	0,0001394	0,989
4	130±13 т	99	-0,00399	0,00060	9,810079	-29,2336	-	0,026612	-	-	-4,03244E-05	0,965
5	143±7т	20	-0,0405	0,0062	14,1	-87,0581	-0,69188	-	-	-	-	0,981
6	180±20 т	241	-0,002	0,00020	7,529	-41,22	-	0,025189	0,08	-	-3,35E-05	0,957
7	265±20 т	112	-	0,0005	2,31124	-	-	-	0,0121	0,0370	0,00035	0,986

Таблиця 3 – Коефіцієнти множинної лінійної регресії рівняння

$$K_{Mg}^S = a \cdot G_{чуг} + b \cdot S_{поя} + c \cdot S_{кин} + d \cdot T_{чуг} + e \cdot H_{ф} + f \cdot I_{pear} + g \cdot W_{г} + h \cdot q_{шп}$$

№	Масив	Кіл-ть дан.	G _{чуг} , т	T _{чуг} , °C	S _{поя} , %	S _{кин} , %	H _ф , м	M _{шп} , %	I _{mg} , кг/ХВ	W _г , М ³ /ГОД	H _{св} , мм	R ²
1	50±15	255	0,432209	-0,04051	651,0341	-764,992	18,14483	-1,02231	1,125958	-	-0,02554	0,974599
2	80±10	217	0,44374	-0,03757	652,3164	-440,2842	12,6060	-1,06167	-	-0,02028	-	0,97095
3	100±10	151	0,288286	-0,00199	804,4425	-1315,54	7,663842	-1,82331	1,207565	-0,40731	-	0,984507
4	130±13	91	0,855612	-0,07507	785,7675	-5,28302	-	-2,14299	-	-	-0,03805	0,982868
5	143±7	20	2,735	-0,403	-	-4829,3	49,52	-	-	-	-	0,9968
6	180±20	241	0,505	-0,026	1257,6	-1243,3	-	-0,190	-	-	-0,0127	0,96307
7	265±20	112	0,16	-0,2144	200,5069	-	5,9174	-	-	-	-0,0043	0,98509

Таблиця 4 – Вплив технологічних факторів та параметрів на питомі витрати магнію (q_{Mg}) та ступінь використання магнію (K_{Mg}) при обробці чавуну в ківшах різного типорозміру

№ з/п	Найменування показника	Маса оброблюваного чавуну, т						
		50±15	80±10	100±10	130±13	143±7	180±20	265±20
1	Підвищення питомої витрати магнію зі збільшенням початкового вмісту сірки на 0,01%, кг/т	0,089	0,069	0,063	0,098	0,141	0,075	0,023
2	Підвищення ступеня використання магнію зі збільшенням початкового вмісту сірки на 0,01%, %	6,51	6,52	8,04	7,86	н/в	12,6	2,01
3	Зниження питомої витрати магнію зі збільшенням кінцевого вмісту сірки на 0,001%, кг/т	0,011	0,022	0,016	0,029	0,087	0,041	н/в
4	Підвищення ступеня використання магнію зі збільшенням кінцевого вмісту сірки на 0,001%, %	0,765	0,804	1,316	н/в	н/в	1,243	н/в
5	Підвищення питомої витрати магнію зі збільшенням температури чавуну на 100 °С, кг/т	0,063	0,053	0,007	0,060	н/в	0,020	0,05
6	Зниження ступеня використання магнію зі збільшенням температури чавуну на 100 °С, %	4,051	3,757	0,199	7,507	н/в	2,6	21,4
7	Зниження питомої витрати магнію при збільшенні маси чавуну, що обробляється, на 1 т, кг/т	0,012	0,0106	0,008	0,004	н/в	0,002	н/в
8	Підвищення ступеня використання магнію при збільшенні маси чавуну, що обробляється, на 1 т, %	0,432	0,444	0,288	0,856	н/в	0,505	0,16
9	Зниження питомої витрати магнію зі збільшенням глибини занурення фурми на 1 м, кг/т	0,217	0,016	0,063	н/в	н/в	н/в	н/в
10	Підвищення ступеня використання магнію зі збільшенням глибини занурення фурми на 1 м, %	18,15	12,61	7,66	н/в	н/в	н/в	5,92
11	Підвищення питомої витрати магнію зі збільшенням маси шлаку на 1%, кг/т	0,019	0,016	0,035	0,027	н/в	0,025	н/в
12	Зниження ступеня використання магнію зі збільшенням маси шлаку на 1%, %	1,022	1,062	1,82	2,14	н/в	0,190	н/в
13	Підвищення питомої витрати магнію зі збільшенням витрати газозосія на 1 м ³ /год, кг/т	0,0004	0,022	н/в	н/в	н/в	н/в	0,037
14	Зниження ступеня використання магнію зі збільшенням витрати газозосія на 1 м ³ /год, %	0,02	0,407	н/в	н/в	н/в	н/в	н/в
15	Підвищення питомої витрати магнію зі збільшенням інтенсивності подачі магнію 1 кг/хв, кг/т	0,098	0,038	0,093	н/в	н/в	0,08	0,012
16	Зниження ступеня використання магнію зі збільшенням інтенсивності подачі магнію 1 кг/хв, %	1,126	н/в	1,208	н/в	н/в	н/в	н/в

Аналіз результатів дослідження. Аналіз отриманих результатів математико-статистичної обробки фактичних даних, що характеризують процеси десульфурації доменного чавуну зернистим магнієм, дозволив оцінити одиничний вплив низки технологічних факторів і параметрів на ефективність реалізованих у промислових умовах процесів десульфурації чавуну магнієм. Проведений математико-статистичний аналіз показав:

- збільшення вмісту сірки в оброблюваному чавуні перед обробкою на 0,01% призводить до підвищення ступеня використання магнію в межах 2,0-12,6%;

- збільшення вмісту сірки в оброблюваному чавуні після обробки на 0,001% призводить до підвищення ступеня використання магнію в межах 0,8 - 1,3%;

- збільшення температури чавуну на 100 °С призводить до зниження ступеня використання магнію в межах 0,2 - 21,4%;

- збільшення маси чавуну, що обробляється, на 1 т призводить до підвищення ступеня використання магнію в межах 0,16 - 0,86%;

- збільшення глибини занурення фурми на 1 м призводить до підвищення ступеня використання магнію в межах 5,9 - 18,2%;

- збільшення маси шлаку перед обробкою на 1% призводить до зниження ступеня використання магнію в межах 0,19 - 2,1%;

- збільшення витрати газоносія на 1 м³/год призводить до зниження ступеня використання магнію в межах 0,02 - 0,41%;

- збільшення інтенсивності подачі магнію на 1 кг/хв до зниження ступеня використання магнію в межах 1,1 - 1,2%.

Зіставлення отриманих результатів математико-статистичної обробки фактичних даних, що характеризують процеси десульфурації доменного чавуну зернистим магнієм, з результатами теоретичної оцінки, що базується на фізико-хімічних розрахунках, дозволяє оцінити наявність та потенційні можливості підвищення ефективності процесів десульфурації чавуну, що реалізуються в різних вихідних умовах. З даних таблиці 4 видно, що в проаналізованих процесах десульфурації чавуну найбільші резерви щодо вдосконалення технологій десульфурації є за рахунок ефективнішого використання впливу на процес початкового та кінцевого вмісту сірки в чавуні.

Аналіз фактичних і наведених коефіцієнтів ступеня використання магнію на сірку (табл. 1), які були розраховані для умов, відповідних середньозваженим величин факторів і параметрів, підтвердив, що на ряді підприємств є резерви для підвищення ефективності реалізованих процесів десульфурації.

У проведених дослідженнях не враховувався вплив на процес

десульфурзації хімічного складу та характеристик ковшового шлаку (в'язкості, основності, сульфідної ємності), які могли, як відомо [4], істотно впливати на ефективність процесу десульфурзації.

При теоретичній оцінці не було виявлено істотного впливу глибини ванни рідкого чавуну на ефективність десульфурзації, а математико-статистична обробка фактичних даних показала, що зі збільшенням глибини введення фурм у розплав ефективність процесу значно зростає (в середньому на 11,1%). У процесі теоретичного аналізу впливу глибини ванни на процес десульфурзації враховувалася лише зміна величини енергії Гіббса. При цьому кінетичні умови обробки та характер динаміки перебігу процесів обробки, що супроводжуються зміною агрегатного стану магнію, могли значно впливати на ефективність процесу десульфурзації [4].

Висновки

Виконана математико-статистична обробка фактичних даних, що характеризують процеси десульфурзації доменного чавуну зернистим магнієм, забезпечила можливість більш обґрунтовано прогнозувати необхідні питомі витрати магнієвих реагентів у процесі розробки технологічної документації для створення нових комплексів десульфурзації чавуну магнієм.

Зіставлення отриманих результатів математико-статистичної обробки з результатами теоретичної оцінки впливу технологічних факторів і параметрів на ефективність процесу десульфурзації чавуну магнієм дозволило оцінити наявність і потенційні можливості підвищення ефективності процесів десульфурзації чавуну, що реалізуються в різних вихідних умовах.

З метою вдосконалення технологічних процесів десульфурзації чавуну магнієм рекомендовано контролювати та, при необхідності, коригувати хімічний склад та параметри ковшових шлаків для підвищення їх основності та сульфідної ємності.

Показано доцільність, по мірі розширення скомп'юнованого банку фактичних даних, продовжити їх математико-статистичну обробку з метою уточнення одиничного впливу на ефективність процесу десульфурзації чавуну вихідних умов та параметрів обробки.

Перелік посилань

1. International Magnesium Association The Global Voice for magnesium, October 21, 1999.
2. Воронова Н. А. Десульфурация чугуна магнием. М. : Металлургия, 1980. 239 с.
3. Шевченко А. Ф., Большаков В. И., Башмаков А. М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. Киев :

Наукова думка, 2011. 205 с.

4. Шевченко А. Ф., Маначин И. А., Вергун А. С. и др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология, исследования, анализ, совершенствование. Днепр : Днепро – VAL6 2017. 252 с.

5. Зборщик А. М. Анализ исследований десульфурации чугуна магнием. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2001. №6. С. 18-20.

6. Зборщик А. М., Климанчук В. В., Косолап Н. В. Эффективность современных технологий десульфурации чугуна магнием. *Металл и литье Украины*. 2006. №3-4. С. 20-22.

7. Зборщик А. М. Влияние растворимости и условий растворения магния в чугуне на эффективность десульфурации металла. *Черная металлургия*. 2014. №4. С. 26-34.

8. Шевченко А. Ф. Комплексный подход при выборе и оценке технологии внепечной десульфурации чугуна. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України*, 2010. Вип. 22. С. 106-120.

9. Hot metal desulphurization by CaCMVlg coinjection in Usiminas Steel Shop 2 / C. Sergio, P. Alessandro, V. Jose Flavio, J. Lee // *ISS Steelmaking Conference*, Chicago, USA. 1999. P. 183 – 201.

10. Шевченко А. Ф. Разработка и развитие теории и технологии процессов внепечной десульфурации чугуна в ковшах вдуванием диспергированных реагентов. *Дисс....д-ра техн. наук 05.16.02.- Днепрпетровск : ІЧМ НАНУ*. 1997. 426 с.

11. Зборщик А. М. Развитие теории и процессов десульфурации и модифицирования чугуна магнием. *Дисс....д-ра техн. наук 05.16.02.- Донецк: ДГТУ*. 1995. – 324 с.

12. Вергун А. С. Развитие теории и разработка ресурсо- и энергосберегающих технологий ковшевого рафинирования чугуна перед кислородно-конвертерной плавкой. *Дисс....д-ра техн. наук 05.16.02. Днепрпетровск : 2003*. 388 с.

13. Сигарев Е. Н. Научное обоснование и разработка комплексной энергоэффективной технологии конвертерного производства железуглеродистого полупродукта. *Дисс....д-ра техн. наук 05.16.02.- Днепрпетровск : ІЧМ НМетАУ*. 2012. 531 с.

14. Зборщик А. М. Анализ термодинамики и кинетики десульфурации чугуна магнием. *Сталь*. 2001. №7. С. 17-20.

15. Мачикин В. И., Складановский Е. Н. Исследование десульфурации чугуна магнием. *Сталь*. 1979. №4. С. 251-254.

16. Охотский В. Б. Модель десульфурации чугуна. *Магний. Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. №1. С. 23-25.

17. Дюдкин Д. А., Гринберг С. Е., Маринцев С. Н. Механизм десульфурации чугуна гранулированным магнием. *Металлург*. 2001. №4. С. 38-40.

18. Irons G. A, Guthrie I. L. Кинетика десульфурации расплавленного железа с использованием пара магния. *Metallurgical Transactions B*. 1981. №12B. P. 755-767.

19. Irons G., Guthrie I. Кинетические аспекты десульфурации чугуна магнием. *Metals Society*. 1981. №3. P.114-121.
20. Конопля В. Г., Плохих П. А. О механизме десульфурации чугуна при обработке его магнием. *Металлургия и коксохимия*. 1985. №88. С. 49-55.
21. Носоченко О. В., Баптизманский В. И., Иванов Е. А., Шевченко А. Ф., Двоскин Б. В., Лонский А. М., Поживанов М. А. Закономерности десульфурации чугуна гранулированным магнием. *Сталь*. 1993. №8.
22. Вергун А. С. Механизм процесса десульфурации чугуна магнием. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. №3. С. 19-22.
23. Rudenko A. L. The Kinetics of Interfacial Transfer of Sulfur During Hot metal Treatment with. The Seventh International Conference on Material Technologies and Modeling MMT – 2012, Ariel University Center of Samaria Ariel, Israel, August 20-23, 2012. P. 138-149.
24. Изучение закономерностей взаимодействия холодного двухфазного магнийсодержащего потока с расплавом чугуна при истечении на больших глубинах рафинирования ванны // Отчет по НИР. Институт черной металлургии НАН Украины. № госрегистрации 0106U03771. – Днепропетровск, 2005. 253 с.
25. Белай Г. Е., Дембровский В. В., Соценко О. В. Организация металлургического эксперимента. Москва : Металлургия, 1993. 256 с.
26. Организация эксперимента / В. И. Баптизманский, Ю. Н. Яковлев, Ю. С. Паниотов. К. : УМКВО, 1992. 244 с.

References

1. International Magnesium Association The Global Voice for magnesium, October 21, 1999.
2. Voronova, N. A. (1980). *Desulfuratsyia chuhuna mahnyem*. Metallurhyia
3. Shevchenko, A. F., Bolshakov, V. Y., & Bashmakov, A. M. (2011). *Tekhnolohyia y oborudovanye desulfuratsyy chuhuna mahnyem v bolshehruznykh kovshakh*. Naukova dumka
4. Shevchenko, A. F., Manachyn, Y. A., Verhun, A. S. et al. (2017). *Vnepechnaia desulfuratsyia chuhuna v kovshakh. Tekhnolohyia, yssledovanyia, analiz, sovershenstvovanye*. Dnepro – VAL
5. Zborshchuk, A. M. (2021). *Analyz yssledovanyi desulfuratsyy chuhuna mahnyem. Metallurgichnskaia i gornorudnaia promyshlennost*, (6), 18-20
6. Zborshchuk, A. M., Klymanchuk, V. V., & Kosolap, N. V. *Effektivnost sovremennykh tekhnologii desulfuratsii chuguna magniєм. Metall i lite Ukrainy*, (3-4), 20-22.
7. Zborshchik, A. M. (2014). *Vliianie rastvorimosti i uslovii rastvorenii magniia v chugune na effektivnost desulfuratsii metalla. Chernaia metallurgii*, (4), 26-34
8. Shevchenko, A. F. (2010). *Kompleksnyi podkhod pri vybore i otenke tekhnologii vnepechnoi desulfuratsii chuguna. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 22, 106-120
9. Sergio, C. , Alessandro, P. , Flavio, V. J., & Lee, J. (1999). Hot metal desulphurization by CaCMVlg coinjection in Usiminas Steel Shop 2. In: *ISS Steelmaking Conference, Chicago, USA*, pp. 183 – 201

10. Shevchenko, A. F. (1997). *Razrabotka i razvitie teorii i tekhnologii protsessov vnepechnoi desulfuratsii chuguna v kovshakh vduvaniem dispergirovannykh reagentov*. D. Sc. thesis, specialty 05.16.02. Dnepropetrovsk, IChM NANU

11. Zborshchik, A. M. (1995). *Razvitie teorii i protsessov desulfuratsii i modifitsirovaniia chuguna magniem*. D. Sc. thesis, specialty 05.16.02. Donetsk, DGTU.

12. Vergun, A. S. (2003). *Razvitie teorii i razrabotka resurso- i energosbergaiushchikh tekhnologii kovshevogo rafinirovaniia chuguna pered kislorodno-konverternoi plavkoi*. D. Sc. thesis, specialty 05.16.02. Dnepropetrovsk

13. Sigarev, E. N. (2012). *Nauchnoe obosnovanie i razrabotka kompleksnoi energoeffektivnoi tekhnologii konverternogo proizvodstva zhelezouglerodistogo poluprodukta*. D. Sc. thesis, specialty 05.16.02. Dnepropetrovsk, IChM NMetAU

14. Zborshchik, A. M. (2001). Analiz termodinamiki i kinetiki desulfuratsii chuguna magniem. *Stal*, (7), 17-20

15. Machikin, V. I., & Skladanovskii, E. N. (1979). Issledovanie desulfuratsii chuguna magniem. *Stal*, (4), 251-254

16. Okhotskii V. B. (2001). Model desulfuratsii chuguna. *Magnii. Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, (1), 23-25

17. Diudkin, D. A., Grinberg, S. E., & Marintcev, S. N. (2001). Mekhanizm desulfuratsii chuguna granulirovannym magniem. *Metallurg*, (4), 38-40

18. Irons, G. A., & Guthrie, I. L. (1981). Kinetika desulfuratsii rasplavennogo zheleza s ispolzovaniem para magniia. *Metallurgical Transactions B*, (12B), 755-767

19. Irons, G., & Guthrie, I. (1981). Kineticheskie aspekty desulfuratsii chuguna magniem. *Metals Society*, (3), 114-121

20. Konoplia, V. G., & Plokhikh, P. A. (1985). O mekhanizme desulfuratsii chuguna pri obrabotke ego magniem. *Metallurgiiia i koksokhimiia*, (88), 49-55

21. Nosochenko, O. V., Baptizmanskii, V. I., Ivanov, E. A., Shevchenko, A. F., Dvoskin, B. V., Lonskii, A. M., & Pozhivanov, M. A. (1993). Zakonomernosti desulfuratsii chuguna granulirovannym magniem. *Stal*, (8)

22. Vergun, A. S. (2000). Mekhanizm protsessa desulfuratsii chuguna magniem. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, (3), 19-2222. Verhun A.S. Mekhanyzm protsessa desulfuratsyy chuhuna mahnyem. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*. 2000.- №3. – S19-22.

23. Rudenko, A. L. (2012). The Kinetics of Interfacial Transfer of Sulfur During Hot metal Treatment with. *The Seventh International Conference on Material Technologies and Modeling MMT – 2012, Ariel Univesity Center of Samaria Ariel, Israel, August 20-23, 2012*, pp.138-149

24. *Izuchenie zakonomernostei vzaimodeistviia kholodnogo dvukhfaznogo magniisoderzhashchego potoka s rasplavom chuguna pri istechenii na bolshikh glubinakh rafinirovaniia vanny*. (2005). Otchet No. 0106U03771. Institut chernoi metallurgii NAN Ukrainy

25. Belai, G. E., Dembrovskii, V. V., & Sotcenko, O. V. (1993). *Organizatciia metallurgicheskogo eksperimenta*. Metallurgiiia
26. Baptizmanskii, V. I., Iakovlev, Iu. N., & Paniotov, Iu. S. (1992). *Organizatciia eksperimenta*. UMKVO

V. I. Yelisieiev¹, Ph. D. (Pys.-Math.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4999-8142

I. O. Manachyn¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9795-6751

L. S. Molchanov¹, Ph. D. (Tech.), Head of Department, Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6139-5956

V. H. Kysliakov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0002-1775-5050

O. L. Rudenko¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6068-9901

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

MATHEMATICAL AND ANALYTICAL ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS AND PARAMETERS ON THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF DESULFURIZATION OF CAST IRON WITH MAGNESIUM

Abstract. The purpose of the work was to make a mathematical and analytical assessment using the methods of mathematical statistics and modern computer application programs of the unit effect of temperature, initial and final sulfur content, depth of the liquid bath and mass of cast iron, mass of ladle slag, intensity of magnesium supply, consumption of gas carrier and freeboard in a ladle on the effectiveness of the desulphurization process of cast iron with magnesium. The comparison of the obtained results of mathematical and statistical processing with the results of a theoretical assessment of the influence of technological factors and parameters on the efficiency of the magnesium iron desulfurization process made it possible to assess the presence and potential opportunities for increasing the efficiency of the iron desulfurization processes implemented in different initial conditions. In order to improve technological processes of desulfurization of cast iron with magnesium, it is recommended to control and, if necessary, adjust the chemical composition and parameters of ladle slags to increase their basicity and sulfide capacity. The expediency is shown, on measures and expansion composed bank of actual data, continue their mathematical and statistical processing for clarification purposes single impact on efficiency process desulfurization cast iron initial conditions and parameters processing.

Key words: desulfurization, cast iron, statistical analysis, ladle, slag, mixer.

For citation: Yelisieiev, V. I., Manachyn, I. O., Molchanov, L. S., Kysliakov, V. H., & Rudenko, O. L. (2024). Mathematical and analytical analysis of the influence

of technological factors and parameters on the efficiency of the process of desulfurization of cast iron with magnesium. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 146-167. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-146-167>.

Стаття надійшла до редакції збірника 27.09.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)