9. **Zhang J., Yin X., Liu J.** Economic MPC of deep cone thickeners в coal benedication, The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2016. Vol. 94. DOI: 10.1002/cjce.22419.

10. **Tan C.K., Setiawan R., Bao J., Bickert G.** Studies on parameter estimation and model predictive control of paste thickeners. Journal of Process control. 2015. Vol. 28. DOI: 10.1016/j.jprocont.2015.02.002.

11. Basics in Minerals Processing, Metso Corporation, 2015. URL: https://www.mogroup.com/insights/e-books/basics-in-minerals-processing-handbook/

12. **Teerikoski S.** Optimal control of clarifier-thickeners. Uppsala University, 2017. 73 p.

13. **Chai T., Li H., Wang H.** An intelligent switching control для intervals of concentration and flow-rate underow slurry in mized separation thickener. 19th IFAC World Congress. Cape Town 2014.

14. **Burger R., Diehl S., Faras S., Nopens I., Torfs E.** A consistent modelling methodology for secondary settling tanks: a reliable numerical method. Water Science & Technology. 2013. Vol. 68(1). 23823556. DOI: 10.2166/wst.2013.239

15. **Barth A., Burger R., Kroker I., Rohde C.** Computational uncertainty quantification for a clarifier-thickener model with several random perturbations: A hybrid stochastic Galerkin approach. Computers & Chemical Engineering. 2016. Vol. 89. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.016.

16. **Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A.** Simulation of high-energy ultrasound propagation in heterogeneous medium using k-space method. Metallurgical and Mining Industry. 2014. Vol. 6. No. 3. P. 23–27.

17. **Morkun V., Morkun N.** Estimation of the crushed ore particles density in the pulp flow based on the dynamic effects of high-energy ultrasound. Archives of Acoustics. 2018. Vol. 43. No. 1. P. 61–67.

18. **Burger R., Diehl S., Faras S., Nopens I.** On reliable and unreliable numerical methods for simulation of secondary settling tanks in wastewater treatment. Computers and Chemical Engineering. 2021. Vol. 41. P. 93-105

УДК 669.162.267.6

О.С. ВОДЕННІКОВА[·], канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет
Л.В. ВОДЕННІКОВА, асист., Запорізький державний медичний університет
І.Е. СКІДІН, канд. техн. наук, ст. викл. Л.Н. САІТГАРЕЄВ, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет
П.В. ГОЛОВКОВ, студ., Запорізький національний університет

ПОЗАДОМЕННА ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ ЧАВУНУ: ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АНАЛІТИЧНО-РОЗРАХУНКОВА ОБРОБКА ПОКАЗНИКІВ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

Мета. Метою роботи є пошук раціональних шляхів зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну для отримання низькосірчастої сталі.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями: проаналізувати сучасні технології позадоменної десульфурації з застосуванням різних реагент-десульфураторів; визначити найбільш раціональні технології позадоменної десульфурації чавуну, які дозволяють досягти ступеня десульфурації чавуну до 80–99 % та вмісту сірки після десульфурації чавуну до 0,003 %; на основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропонувати аналітично-розрахункову обробку показників десульфурації чавуну.

Методи досліджень. У роботі застосовувалися загальні (емпіричні, комплексні й теоретичні) та спеціальні (графічні та кореляційні) методи наукових пізнань. Так при узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з аналізу сучасного досвіду технологій позадоменної десульфурації чавуну використовувався комплексний підхід. Аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

Наукова новизна. Показано вплив вмісту магнію в чавуні на вміст сірки після десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію, пасивованого магнію у шматках, порошкового магнієвого дроту, суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна. Здобула подальший розвиток аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних з оцінкою коефіцієнту детермінації, що показує на можливості зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну до 0,003 %.

Практичне значення. Результати пошуку раціональних шляхів збільшення ступеня десульфурації чавуну для отримання низькосірчастої сталі можуть бути використані при викладанні спеціальних дисциплін для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія» (наприклад, навчальної дисципліни «Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу»).

Результати. Проаналізовано технологічні аспекти застосування на металургійних підприємствах України та зарубіжжя сучасних технологій позадоменної десульфурації чавуну, які дозволяють досягти значень ступеня десульфурації чавуну в межах 80–99 % та вмісту сірки після десульфурації чавуну до 0,003 %.

Ключові слова: десульфурація чавуну, низькосірчаста сталь, реагент-десульфуратор, ступінь десульфурації, вміст сірки.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-57-64

[·]© Воденнікова О.С., Воденнікова Л.В., Скідін І.Е., Саітгареєв Л.Н., Головков П.В., 2021

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Відомо, що при виплавці сталі в сталеплавильному агрегаті (кисневому конвертері або мартенівській печі) основна кількість сірки потрапляє у ванну печі у складі рідкого чавуну, який містить від 0,03 до 0,05 % сірки [1, 2]. Основні підходи до отримання металу з різним вмістом сірки полягають в наступному [3]:

сталь із вмістом сірки ≥ 0,025 % може бути виплавлена в сталеплавильному агрегаті з використанням чавуну, що містить до 0,030–0,040 % сірки, та металевого брухту звичайної якості;

сталь із вмістом сірки 0,015–0,020 % може бути отримана в сталеплавильному агрегаті з використанням передільного чавуну, що містить 0,015–0,020 % сірки, та металевого брухту звичайної якості;

для виплавки в сталеплавильному агрегаті металу з вмістом сірки 0,010–0,015 % металева шихта повинна складатися з передільного чавуну із вмістом сірки < 0,010 % та низькосірчастого оборотного металевого брухту;

сталь із вмістом сірки < 0,010 % може бути отримана з використанням низькосірчастого передільного чавуну, оборотного металевого брухту та одного із способів позапічної десульфурації сталі.

При цьому слід зазначити, що застосування позадоменної десульфурації чавуну, використовуючи у якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію, дає змогу зменшити вміст сірки в чавуні до меж 0,001–0,002 % [4].

Слід зазначити, що сучасна технологія десульфурації чавуну магнієм характеризується наступними ознаками [5]:

можливістю обробки чавуну в ковшах різного типу (заливальних, доменних, міксерних, ливарних та інших) місткістю 0,3–420 т чавуну, що мають вільний простір над розплавом в межах 0,25–0,5 м;

зниженням вмісту сірки в чавуні до 0,001–0,003 %;

застосуванням первинного, вторинного магнію і сплавів магнію в диспергованому вигляді (гранулах, зернах з розміром частинок 0,5–1,4 мм) без добавок, що пасивують;

застосуванням різних типів газів-носіїв (природного газу або аргону) при концентрації магнію в газі не менше 12 кг/м^3;

регульованою інтенсивністю введення магнієвого реагенту в розплав із витратою газуносія 30–40 нм^3/год. (при використанні фурм з випарними камерами);

підвищенням за необхідності сульфідної місткості ковшових шлаків коригувальною добавкою (близько 200 кг/т шлаку) фракціонованого вапна (фракції 2–10 мм) або відходів його виробництва;

коригуванням складу газової атмосфери в ковші зі зниженням в ній вмісту кисню нижче 10 %;

введенням магнію в чавун на максимальну глибину фурмами з випарними камерами або без них, але із забезпеченням умов досить повного засвоєння чавуном магнію;

використанням фурм з різними типами футеровок, що забезпечують стійкість фурм у межах 60–2000 обробок (зокрема, залежно від умов експлуатації та обслуговування);

пневмоінжекційним комплексом, що забезпечує плавне і регульоване дозування реагенту з похибкою менше 0,5 % від дози, що подається, і «миттєвою» інтенсивністю вдування, що відрізняється від заданої величини лише на 2 %;

автоматизованою системою управління та контролю роботою обладнання та перебігом технологічного процесу;

ступенем засвоєння магнію чавуном до 95 %;

втратами температури чавуну ≈10 С/хв. обробки;

втратами чавуну з додатково утворюються шлаками навколо 0,5 кг/т.

На сьогодні при виборі раціональної технологічної схеми виробництва якісної сталі (зокрема, низькосірчастої) все більшого застосування набули технологічні комплекси «установка десульфурації чавуну – сталеплавильний агрегат» та «установка десульфурації чавуну – сталеплавильний агрегат – установка «піч-ківш»» [6, 7].

Саме тому проблема пошуку раціональних шляхів зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну для отримання низькосірчастої сталі є досить актуальним напрямком досліджень в металургійному виробництві.

Аналіз досліджень і публікацій. Виконаний авторами роботи [8] аналіз існуючих техно-

логій позадоменної десульфурації чавуну з застосуванням різних реагент-десульфураторів показав, що найбільш ефективними технологіями є (рис. 1): інжекція (вдування) суміші на основі магнію (ступінь десульфурації 95–99 %); інжекція сумішей на основі вапна та магнію (ступінь десульфурації 95–98 %); обробка за технологією глибинного дугового відновлення (ступінь десульфурації 90–98 %); обробка екзотермічними брикетами (ступінь десульфурації 65–85 %). Результати досліджень показують, що розглянуті технології пов'язані з використанням додаткового устаткування та відповідно наявності вільного місця для його встановлення, що потребує додаткових матеріальних витрат, які не завжди є економічно обґрунтованими.

Аналіз досліджень можливості використання магнієвого порошкового дроту для десульфурації, представлених у роботах [9, 10] не дозволяє рекомендувати цю технологію до широкого використання в промислових умовах. Так результати десульфурації чавуну порошковим дротом на 300–350 тонних заливальних ковшах киснево-конверторних цехів ВАТ «Магнітогорський металургійний комбінат» (Російська Федерація), ВАТ «Северсталь» (Російська Федерація) та ВАТ «Азовсталь» [11, 12] свідчать про досягнення ступеня десульфурації на рівні від 33 до 71 %, що в 1,5 рази менше в порівнянні з іншими методами.

У роботі [13] в умовах ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча» розглядається процес десульфурації чавуну з використання гранульованого магнію, що вдувається через фурму з випарної камерою, введення порошкового дроту з наповнювачем з гранульованого магнію з різними пасивуючими добавками ставролітового концентрату, порошкового феромарганцю, шлакоутворюючої суміші типу ІРС-2. Найбільш високі значення ступеня використання магнію для десульфурації чавуну отримані при використання в якості наповнювача порошкового дроту залізо-кремній-магнієвої лігатури. При обробці чавуну, що вміщує 0,025–0,001 % S, ступінь використання магнію для десульфурації змінювалася від 35,8 до 53,4 %, що більше ніж в два рази у випадку використання порошкового дроту з металевим магнієм.

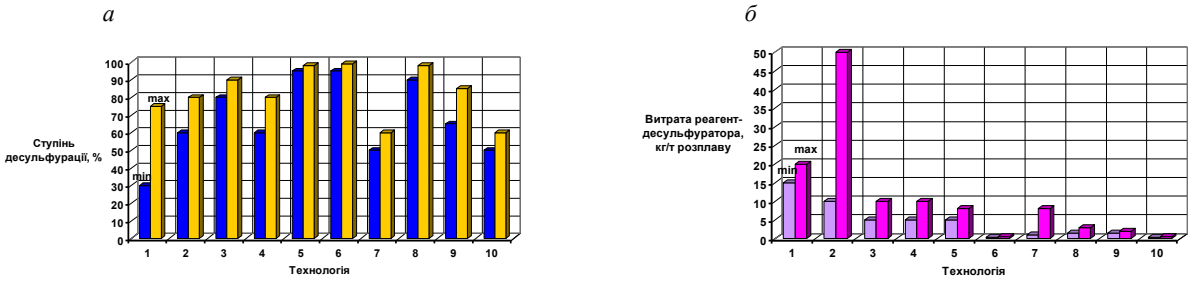

Рис. 1. Порівняльний аналіз ступеня десульфурації (*а*) та витрати реагент-десульфуратора (*б*) при різних технологіях позапічного рафінування: *1* – обробка твердими шлаковими сумішами; *2* – обробка рідкими синтетичними шлаками; *3* – обробка содою (Na_2CO_3); *4* – обробка порошкоподібною сумішшю, що містить вапно; *5* – інжекція сумішей на основі вапна та магнію; *6* – інжекція сумішей на основі магнію; *7* – обробка магнієм в шматках; *8* – обробка за технологією глибинного дугового відновлення; *9* – обробка синтетичними брикетами; *10* – обробка порошковим дротом

Слід зазначити, що значний інтерес представляє метод десульфурації чавуну з обробкою рідкого чавуну магнієм, відновленого з оксидів. При цьому використовуються недорогі магнезит, доломіт, феросиліцій та алюміній [14].

Не слід обходити увагою також дослідження використання екзотермічних магнійвмісних брикетів [15] з сумішей оксиду магнію з алюмінієм і оксиду заліза з алюмінієм, а також застосування в складі брикету до 10 % інертного наповнювача (металевої стружки). Використання оксиду магнію з алюмінієм збільшує ступінь десульфурації до 53,3 %, при цьому вміст сірки після обробки досягає значень 0,014 %. Введення в склад брикету залізної стружки в якості інертної добавки при тривалості розчинення брикету на протязі 30 секунд призводить до досягнення ступеня десульфурації значень до 70 %.

У дослідженнях [16] приведено порівняння десульфурації чавуну продуванням гранульованим магнієм через фурми з випарними камерами в 140-ка тонних чавуновозних ковшах ВАТ «Азовсталь» та продувкою сумішшю гранульованого магнію та порошкоподібного вапна в 350-т тонних заливальних ковшах киснево-конвертерного цеху ВАТ «Новоліпецький металургійний комбінат» (Російська Федерація) [17].

Одним з шляхів підвищення ефективності використання магнію для позадоменної десуль-

фурації чавуну є використання вторинних магнієвих сплавів. Зокрема при заміні чистого магнію вторинним сплавом, що містить 12,2 % алюмінію, ступінь використання магнію на десульфурацію збільшується з 38,5 до 46,6 % [18].

В роботі [19] в умовах киснево-конвертерного цеху ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» проаналізовані результати промислових досліджень ефективності використання магнію для десульфурації чавуну в 300-т тонних заливальних ковшах з використанням обладнання, виготовленого за ліцензією фірми «Polysius AG» (Німеччина). Застосування запропонованої технології дозволяє збільшити ступінь використання магнію на десульфурацію чавуну від 1,3 до 1,4 рази.

Авторами роботи [20] проаналізовано дослідження впливу на ефективність десульфурації металу змінення розчинності магнію в чавуні. При інжектуванні гранульованого магнію в чавун з використанням в якості газоносія аргону або азоту підвищення ефективності десульфуратора може бути досягнуто в результаті зниження концентрації магнію в газі, що транспортується. Встановлено, що обробка передільного чавуну сумішшю пари магнію з азотом не тільки не погіршує ефективність використання десульфуратора, але і дозволяє компенсувати окислення частини магнію киснем повітря. Дослідження, присвячені пошуку зв'язку ефективності використання магнію для десульфурації природно-легованого чавуну та концентрації кремнію у ньому (від 1,6 до 6,6 %), не дали позитивних результатів, при цьому спостерігалися лише одиничні випадки, коли вміст кремнію збільшувався до 7–9 %.

Порівняння різних технологій ківшевої десульфурації чавуну магнієм приведено в дослідженнях [21]. Авторами наведено зіставлення технології інжекції суміші на основі вапна та магнію, а також інжекції зернистого магнію без добавок. Наведено фактичні дані щодо параметрів шлакоутворення, приходу сірки в конвертер, можливостям ресульфурації, впливу вапна на параметри процесу вдування, умов скачування шлаку та забезпечення особливо глибокої десульфурації чавуну.

При десульфурації немагнієвими реагентами (зокрема, в основному оксидом кальцію (вапном)) процес вдування повинен здійснюватися з індивідуальним введенням у чавун алюмінію. У двофазний потік, що вдувається, вводиться добавка, яка на виході з фурми в розплав вибухоподібним характером випаровується та руйнує скупчення порошку, збільшуючи активну поверхню десульфурації в чавуні та тим самим розподіляючи порошок у розплаві [22].

Постановка завдання. Метою роботи є пошук раціональних шляхів зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну для отримання низькосірчастої сталі.

Викладення матеріалу та результати. У роботі приведено аналітично-розрахункову обробку відомих експериментальних та розрахункових даних залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки при застосуванні реагент-десульфураторів на основі магнію, зокрема, гранульованого магнію (з вмістом > 98,9 % Mg та гранулами у сферичній формі діаметром 0,5–1,6 мм); пасивованого магнію у шматках (фракції до 3 мм); порошкового магнієвого дроту; суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна (з вмістом > 94 % CaO, < 0,04 % S та розміром частинок до 100 мкм).

Експериментальні (фактичні) данні вмісту сірки після десульфурації при застосуванні реагент-десульфураторів на основі магнію були взяті з досліджень роботи [23], в якій запропоновано методологію вибору найбільш раціонального процесу рафінування чавуну, що враховує як найбільш високу величину ступеня засвоєння магнію, так і вміст сірки після десульфурації ([S]) та вміст магнію в чавуні ([Mg]) після завершення процесу обробки (рафінування) чавуну у ковші.

Отримані результати дослідження по відношенню фактичних та розрахункових рівноважних значень [S] та [Mg] поділилися на три групи:

технічні процеси вдування чистого магнію (без додавання різноманітних добавок) в струмені різних інжекційних газів, для яких характерна висока ступінь засвоєння магнію (від 85 % до 97 %), практична відповідність розрахункових та практичних значень [S] та [Mg] в інтервалі вмісту сірки 0,002–0,025 % (рис. 2, крива *1*);

процеси вдування порошкових магнієвмісних сумішей та варіанти технології вдування гранульованого магнію, коли забезпечується глибока десульфурація чавуну (< 0,004 % S) та фактичні значення [Mg] нижче рівноважних (рис. 3, крива *1*);

технологічна схема рафінування чавуну може мати недостатньо стійкий характер, так як при визначних несприятливих умовах можливо протікання процесів ресульфурації за рахунок

приближення системи [Mg] – [S] до рівноважної, що обумовлює необхідність введення визначних меж в умовах промислової реалізації цих процесів десульфурації чавуну; перевищення фактичних значень [Mg] після десульфурації (рис. 4, крива *1* та рис. 6, крива *1*) над рівноважними розрахунковими, тобто здійснення цих процесів – процеси обробки чавуну магнієвими композиціями у шматках, порошковим магнієвим дротом та порошковими магнієвими сумішами, для яких характерна невисока ступінь засвоєння магнію (22–47 %) та супроводжується необхідністю більшого насищення чавуну магнієм, більшою його питомою витратою та, відповідно, більшими матеріальними витратами.

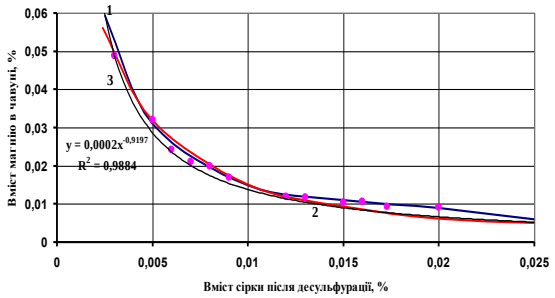

Рис. 2. Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну в 100 тонних доменних ковшах при обробці гранульованим магнієм через фурму з випарником на виході ($T_{чавуну}$ =1410 ^{0}C): •– експериментальні данні роботи [23]; *1* – рівноважні розрахункові данні роботи [23]; *2* – аналітично-розрахункова модель; *3* – лінія тренду кривої *2*

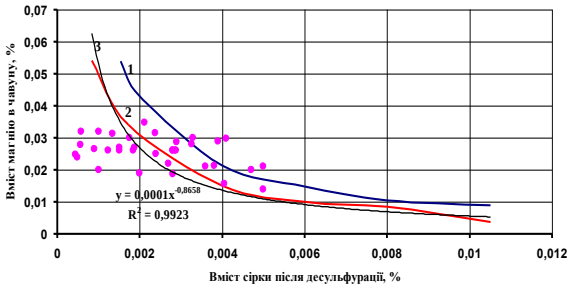

Рис. 3. Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну в 300 тонних заливальних ковшах при обробці гранульованим магнієм ($T_{чавуну}$= 1350 ^{0}C) (супер глибока десульфурація чавуну): ● – експериментальні данні роботи [23]; *1* – рівноважні розрахункові данні роботи [23]; *2* – аналітично-розрахункова модель; *3* – лінія тренду кривої *2*

Обробку запропонованих нами аналітичних залежностей проводили кореляційно - регресійним методом в програмі Excel з оцінкою коефіцієнту детермінації R^2 за допомогою статечної регресії згідно рівняння $y = ax^b$. Величина достовірності апроксимації відображала близькість значення лінії тренду до фактичних даних.

Запропонована нами у роботі аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації в 100-тонних доменних ковшах при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію показала можливість досягнення значення вмісту сірки після десульфурації чавуну до 0,003 % (рис. 2, крива *2*), що в 1,14–1,25 рази нижче рівноважних розрахункових даних роботи [23]. Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 98,84 % лінію статечної регресії (рис. 2, крива *3*).

При обробці гранульованим магнієм чавуну в 300-тонних заливальних ковшах аналітично-розрахункова обробка показала, що вміст сірки після десульфурації чавуну досягає значень менше 0,002 % (рис. 3), що вказує на супер глибоку десульфурацію (< 0,004 % S) та в 1,1–1,6 рази нижче рівноважних розрахункових даних роботи [23]. Так, наприклад, при 0,02 % Mn в чавуні значення розрахункового вмісту сірки після десульфурації дорівнює 0,0035 % (рис. 3, крива *1*), а згідно аналітично-розрахунковій моделі вміст сірки досягає 0,0045 % (рис. 3, крива *2*). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 99,232 % лінію статечної регресії (рис. 3, крива *3*).

Аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора пасивованого магнію у шматках показала, що запропонована аналітично-розрахункова модель знаходиться вище рівноважних розрахункових даних роботи [23] (рис. 4, криві *1* та *2*) та описує на 97,89 % лінію статечної регресії (рис. 4, крива *3*).

При застосуванні обробки порошковим магнієвим дротом запропонована аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну показала на досягнення вмісту сірки в чавуні до 0,003%, що свідчить про процес супер глибокої десульфурації чавуну. Отримана аналітично-розрахункова модель знаходиться вище рівноважних розрахункових даних роботи [23] (рис. 5, криві *1* та *2*) та описує на 84,15 % лінію статечної регресії (рис. 5, крива *3*).

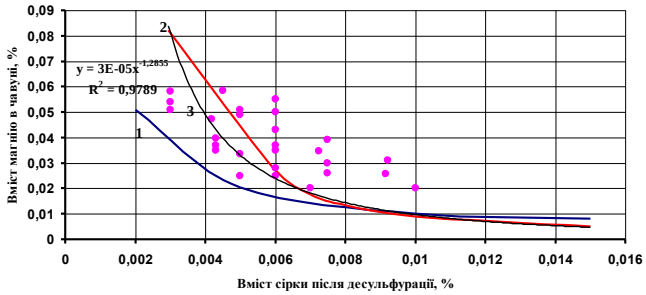

Рис. 4. Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при обробці пасивованим магнієм у шматках ($T_{чавуну}$=1350^{0}C): ● – експериментальні данні роботи [23]; *1* – рівноважні розрахункові данні роботи [23]; *2* – аналітично-розрахункова модель; *3* – лінія тренду кривої *2*

Аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора сумішшю гранулованого магнію та флюідизованого вапна показала можливість зниження вмісту сірки після десульфурації в 1,1–1,3 рази нижче рівноважних розрахункових даних роботи [23]. Так, наприклад, при 0,02 % Mn в чавуні значення розрахункового вмісту сірки після десульфурації дорівнює 0,0039 % (рис. 6, крива *1*), а згідно аналітично-розрахунковій моделі вміст сірки досягає 0,0035 % (рис. 6, крива *2*). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 97,89 % лінію статечної регресії (рис. 6, крива *3*).

Таким чином, порівняльний аналіз вмісту магнію в чавуні при застосуванні різних технологій позадоменної десульфурації чавуну (рис. 2–6) показав, що найбільші значення вмісту магнію в чавуні спостерігаються при обробці пасивованим магнієм у шматках (0,05 % за рівноважними розрахунковими даними (рис. 4, крива *1*) та 0,082 % згідно запропонованої аналітично-розрахункової моделі (рис. 4, крива *2*)), а найменші при обробці порошковим магнієвим дротом (0,001 % за рівноважними розрахунковими даними (рис. 5, крива *1*) та 0,0015 % згідно запропонованої аналітично-розрахункової моделі (рис. 5, крива *2*)).

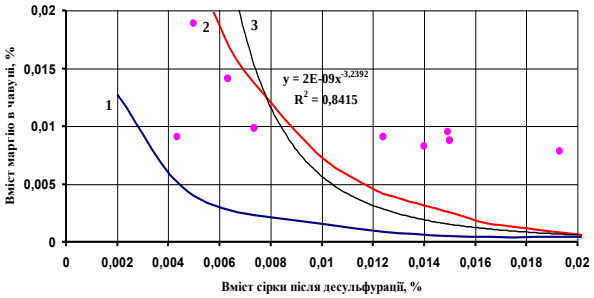

Рис. 5. Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при обробці порошковим магнієвим дротом ($T_{чавуну}$=1260 ^{0}C): ● – експериментальні данні роботи [23]; *1* – рівноважні розрахункові данні роботи [23]; *2* – аналітично-розрахункова модель; *3* – лінія тренду кривої *2*

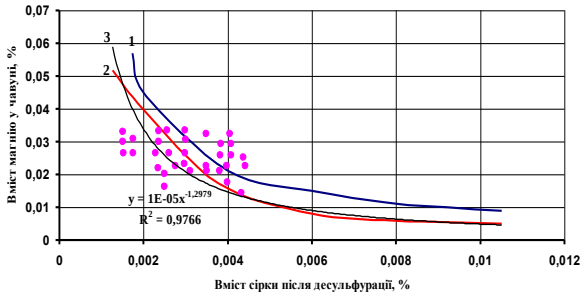

Рис. 6. Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при обробці сумішшю гранулованого магнію та флюідизованого вапна ($T_{чавуну}$=1330 ^{0}C): ● – експериментальні данні роботи [23]; *1* – рівноважні розрахункові данні роботи [23]; *2* аналітично-розрахункова модель; *3* – лінія тренду кривої *2*

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз існуючих технологій позадоменної десульфурації чавуну з застосуванням різних реагент-десульфураторів показав, що найбільш ефективними технологіями є: інжєкція суміші на основі магнію (ступінь десульфурації 95–99 %); інжекція сумішей на основі вапна та магнію (ступінь десульфурації 95–98 %); обробка за технологією глибинного дугового відновлення (ступінь десульфурації 90–98 %); обробка екзотермічними брикетами (ступінь десульфурації 65–85 %).

На основі відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних запропоновано аналітично-розрахункову обробку показників десульфурації чавуну при застосуванні реагент-десульфураторів на основі магнію (гранульованого магнію, пасивованого магнію у шматках, порошкового магнієвого дроту, суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна). Запропонована аналітично-розрахункова модель показала на можливості досягнення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну до 0,003%.

Подальший розвиток досліджень полягає в пошуку методів збільшення ступеня десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора для позадоменної десульфурації натрій- та кальцієвмісних матеріалів, зокрема, карбонату натрію, карбіду кальцію та ціанаміду кальцію.

Список літератури

1. **Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могиталенко В. Г.** Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб.; за ред. акад. НАН України В. Л. Найдека. – Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. – 224 с.

2. **Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. Я., Грищенко С. Г., Шифрін В. М., Шурхало В. Я.** Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підруч. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. – Київ : Вища школа, 2006. – 503 с.

3. Основные принципы получения заданного содержания серы в стали [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://uas.su/books/metstali/63/razdel63.php

4. Рациональная технологическая схема производства низкосернистой кислородно-конвертерной стали / **В.И. Большаков, А.С. Вергун, В.Г. Кисляков, В.П. Корченко** // Металлургические процессы и оборудование. – 2007. – №4(10). – С. 19–22.

5. **Шевченко А. Ф.** Создание современных комплексов внепечной десульфурации чугуна гранулированным магнием / А. Ф. Шевченко, Б. В. Двоскин, Н. Т. Ткач // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2004. Режим доступу до ресурсу: http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/21074/11-Shevchenko.pdf?sequence=1

6. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер» / **А. С. Вергун, В. Г. Кисляков, В. Ф. Поляков и др**. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. научн. тр. – 2007. – Вип. 14. – С. 112–119.

7. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер–КП» / **А. С. Вергун, В. Г. Кисляков, В. Ф. Поляков и др.** // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии : сб. научн. тр. – 2007. – Вип. 15. – С. 99–110.

8. Позапічна десульфурація рідкого чавуну в контексті завдань вітчизняної металургії / **Л. С. Молчанов, К. Г. Нізяєв, Б. М. Бойченко та ін.** // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. – № 2. – С. 38–41.

9. Сопоставление способов десульфурации чугуна / **А. Ф. Шевченко, Б. В. Двоскин, А.С. Вергун и др.** // Сталь. – 2000. – №8. – С. 14–17.

10. **Дюдкин Д. А.** К вопросу рациональной технологи внепечной десульфурации чугуна / Д. А. Дюдкин, С. Е. Гринберг, С. Н. Маринцев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №3. – С. 9–11.

11. Опыт обработки металлургических расплавов порошковыми проволоками на металлургических предприятиях СНГ / **Ю. И. Бать, Д. А. Дюдкин, В. М. Титиевский, В. П Онищук** // Труды четвёртого конгресса сталеплавильщиков (г. Москва, 7–10 октября 1996 г.). – М. : ОАО «Черметинформация», 1997. – С. 281–284.

12. Порошковая проволока для внепечной обработки стали и чугуна / **А. И. Каблуковский, С. И. Ябуров, А. Н. Никулин и др.** // Труды пятого конгресса сталеплавильщиков (г. Рыбница, 14–17 октября 1998 г.). – М. : ОАО «Черметинформация», 1999. – С. 350–353.

13. **Климанчук В.В.** Развитие внедоменной десульфурации чугуна в ОАО «ММК им. Ильича» / В.В. Климанчук // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. праць. – 2010. – Вип.17. – С. 26–34.

14. **Низяев К. Г.** Термодинамический анализ алюмотермического восстановления оксидов магния и кальция в условиях повышенного давления / К. Г. Низяев // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №7. – С. 149–153.

15. Технология обработки чугуна магнезийсодержащими брикетами / **Б. М. Бойченко, К. Г. Низяев, А. Н. Стоянов и др. //** Инновационные технологии внепечной обработки чугуна и стали : науч.-практ. конф. – Днепропетровск : Национальная металлургическая академия Украины, 2011. – [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: https://uas.su/conferences/2011/vnepecnaya/7/razdel7.php

16. **Зборщик А. М**. Эффективность современных технологий внедоменной десульфурации чугуна магнием / А. М. Зборщик, Д. В. Майданник // Прогресивні технології у металургії сталі : XXI сторіччя : труди 3-ї міжнар. наук.-практ. конф. (м. Донецьк, 31 жовтня – 2 листопада 2006 р.). – Донецьк : ДонНТУ, 2007. – С. 145–149.

17. **Зборщик А.М.** Эффективность десульфурации чугуна магнием в крупных заливочных ковшах / А.М. Зборщик // Сталь. – 2002. – №7. – С. 157–160.

18. Внедоменная десульфурация чугуна вторичным магниевым сплавом / **В. А. Дворянинов и др.** // Металлург. – 1979. – №9. – С. 14–17.

19. Десульфурация чугуна в кислородно-конверторном цехе ОАО «Алчевский металлургический комбинат» / **А. М. Зборщик, С. В. Куберский, Г. Я. Довгалюк и др.** // Металл и литьё Украины. – 2010. – №7. – С. 9–12.

20. **Зборщик А. М.** Пути повышения эффективности использования магния для внедоменной десульфурации чугуна / А. М. Зборщик, П. С. Харлашин, Н. В. Косолап // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки. – 2014. – Вип.8. – С. 7–17.

21. Сопоставление различный технологий ковшевой десульфурации чугуна магнием / **А. Ф. Шевченко, А. С. Вергун, А. М. Шевченко и др. //** Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2015. – Вып. 30. – С. 118–129.

22. Повышение обессеривающего потенциала технологических систем инжекционной десульфурации чугуна различными реагентами / **А. Ф. Шевченко, И. А. Маначин, Б. В. Двоскин и др.** // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. –2019. – №75(11). – С. 1237–1243.

23. Рациональный процесс ковшевой десульфурации чугуна реагентами на основе магния / **А. Ф. Шевченко, Б. В. Двоскин, А. С. Вергун и др.** // Специальная металургія : вчера, сегодня, завтра : материалы междун.научн.-техн. Конф. (г. Киев, 8–9 октября 2002г.). – К. : Політехніка, 2002. – С. 337–343.