

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.7

УДК 669.162.267

**Сігарьов Є.М.**, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-8229-7877, e-mail: en\_sigarev@ua.fm

**Єськов Д.В.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої, e-mail: eskovD80@i.ua

**Крячко Г.Ю.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8773-508X, e-mail: nauka\_m4m@ukr.net

**Матина І.М.**, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти,

e-mail: igor.matyna66@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Sigarev Yevhen**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Metallurgy

**Eskov Denis**, Postgraduate Student

**Kryachko Gennadiy**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the

Department of Metallurgy

**Matina Igor**, Master's Degree Student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

### СУЛЬФІДНА ЄМНІСТЬ ТА ВЛАСТИВОСТІ МОДИФІКОВАНИХ КОВШОВИХ ШЛАКІВ

*Фізико-хімічний стан ковшового шлаку у значному ступені є визначальним для перебігу та досягнення заданих результатів видалення сірки із чавуну на установках десульфурації перед сталеплавильною переробкою. Досліджені особливості стабілізації стану і можливості коригування складу залишків доменного або міксерного шлаків на поверхні ковшової ванни перед інжекцією реагентів-десульфураторів та сформованого шлаку перед його скачуванням із залученням CaO- та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-містких відходів сталеплавильної переробки. Розраховано зміну сульфідної ємності ковшових шлаків, модифікованих добавками кінцевого шлаку обробки сталі на агрегати ківш-піч, вплив зміни вмісту MgO та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у ковшовому шлаку системи CaO–SiO<sub>2</sub>–MnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO на його температуру ліквідус та нестационарних температурних умов обробки і основності шлаку на коефіцієнт розподілу сірки. Показано, що для попередження ресульфурації чавуну основність ковшового шлаку B2 повинна бути не нижче 1,1. Із застосуванням методу лінійного програмування визначені області оптимального складу ковшових шлаків, що відповідають вимогам коінжекційної технології ковшової десульфурації чавуну з врахуванням температури плавлення, «хорошої» текучості, в'язкості та плавкості шлаку.*

**Ключові слова:** ківш, чавун, шлак, основність, модифікатор, коригування, сульфідна ємність.

*The physico-chemical state of ladle slag is largely decisive for the progress and achievement of the specified results of sulfur removal from cast iron at desulphurization plants before steelmaking processing. The peculiarities of state stabilization and the possibility of adjusting the composition of blast furnace or mixer slag residues on the surface of the ladle bath before the injection of desulfurizing reagents and the formed slag before its discharge with the involvement of CaO- and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-containing steelmaking waste were investigated. The change in the sulfide capacity of ladle slags modified with additives from the final steel processing slag on the kiln-furnace unit, the influence of changes in the content of MgO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in ladle slag of the CaO–SiO<sub>2</sub>–MnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO system on its liquidus temperature and non-stationary temperature conditions of processing and slag basicity were calculated on the sulfur distribution coefficient. It's shown that basicity of ladle slag B2 should not be lower than 1.1. With the application of the linear programming method, the regions of the optimal composition of ladle slags that meet the requirements of the co-injection technology of ladle desulfurization of cast iron, taking into account the melting temperature, "good" fluidity, viscosity and melting point of the slag, were determined.*

**Keywords:** ladle, cast iron, slag, basicity, modifier, adjustment, sulfide capacity.

### Постановка проблеми

Факторам впливу хімічного складу та фізичного стану доменних або міксерних шлаків, що залишаються на поверхні рідкого чавуну у ковші перед початком вдування реагентів-десульфураторів, на результати десульфурації та питомі витрати реагентів приділено недостатньо уваги.

До основних вимог до ковшових шлаків, що сформовані по ходу вдування реагентів-десульфураторів вглиб ванни можна віднести: спроможність акумулювати й утримувати сірку у вигляді сульфідів, забезпечення масоперенесення утворених з'єднань через границю шлак-метал та мінімізацію втрат чавуну з корольками при скачуванні шлаку після обробки. Маса сірки, яка може бути видалена з ковшовим шлаком, визначається терміном «продуктивність видалення сірки шлаком». Продуктивність видалення сірки шлаком, як здатність до видалення сірки з чавуну, дещо відрізняється від термодинамічно визначеної «сульфідної ємності» ( $C_s$ ), яка була введена Фінчемом і Річардсоном [1] як «потенційна здатність розплаву утримувати сірку у вигляді сульфїду».

Оскільки обсяг та склад ковшового шлаку змінюється в ході вдування реагентів, то і продуктивність видалення сірки повинна бути достатньою протягом усього процесу. У свою чергу, склад шлаку, що здатен мінімізувати втрати заліза, повинен бути досягнутий наприкінці обробки, тому основна увага перед скачуванням приділяється кінцевому складу шлаку.

При використанні найбільш розповсюдженої на сьогодні коінжекційної технології десульфурації чавуну на установках десульфурації (УДЧ) з використанням порошкоподібного вапна та диспергованого магнію кінцевий ковшовий шлак (КШ) після десульфурації чавуну зазвичай складається із залишків доменного (ДШ, обсягом зазвичай від 400 до 2500 кг) або міксерного шлаку (МШ, 200—1500 кг) та продуктів реакцій домішок чавуну з введеними реагентами-десульфураторами. Утворення нових з'єднань призводить до перманентних змін хімічного складу шлаку і його властивостей (температури плавлення, в'язкості, текучості, поверхневого натягу тощо). Крім того, ступінь гомогенності та однорідності шлаку, сульфідна ємність ( $C_s$ ) та розподіл сірки між шлаком та металом ( $L_s$ ) суттєво залежать як від складу, так і температури у системі.

Збільшення обсягу та зміна властивостей ковшового шлаку призводить до виникнення супутніх проблем, пов'язаних як зі зменшенням ступеня розчинення CaO по ходу рафінування, так і зі збільшенням втрат чавуну зі шлаком, що обов'язково скачують після десульфурації. Втрати чавуну зі шлаками, що скачують (в основному колоїдні втрати заліза), складають від 0,6—1,2 % [2, 3] до 0,5—2,5 % [4] від маси металу. Такі втрати, поряд із витратами на інжекційні заглибні фурми та реагенти, залишаються однією з найбільших статей витрат на рафінування чавуну.

Колоїдні втрати заліза мінімізуються [1] шляхом підвищення поверхневого натягу та зменшення уявної в'язкості шлаку, що у типових умовах УДЧ відповідає мінімізації вмісту твердої фракції шлаку. Такі умови забезпечуються або підвищенням температури шлаку (мінімізацією втрат температури чавуну ( $T_{\text{чав}}$ ) на технологічному маршруті «доменна піч — УДЧ») або зниженням основності шлаку, що відповідно знижує температуру його плавлення ( $T_{\text{пл}}$ ). Так, наприклад, в Зальцгіттере [5], втрати заліза при  $T_{\text{чав}} = 1250$  °C та вдуванні вапна з утворенням «сухих» шлаків складали 8—12 кг/т, а з підвищенням  $T_{\text{чав}}$  та забезпеченням рідкорухомості шлаку зменшились до 0,2—0,6 кг/т чавуну.

Крім перерахованих вище умов, для ефективного видалення сірки з чавуну ( $[S]_{\text{чав}}$ ), основність ковшового шлаку ( $B_2 = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ ), за оцінками більшості дослідників, повинна бути  $\geq 1$ , а витрати вапна забезпечувати достатню для формування  $\text{CaS}_{\text{тв}}$  кількість (CaO) та достатні величини  $C_s$  та  $L_s$ . При цьому необхідно, щоби  $T_{\text{пл}}$  була нижче за фактичну температуру шлаку для забезпечення його рідкорухомості, гомогенності та максимізації повернення крапель Fe із шлаку до металеві ванни [2]. Нижча основність шлаку знижує в'язкість шлаку, але одночасно зменшує і його спроможність утримання сірки, тому актуальним залишається вибір раціонального складу ковшових шлаків у різні періоди проведення операції десульфурації.

Водночас ефективне видалення КШ з поверхні ванни після десульфурації без втрат (захоплення скімером) чавуну може бути ускладнене без його загущення, особливо для чавунів з низькою температурою (< 1300 °С) й значною величиною співвідношення витрат CaO/Mg.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Згідно з результатами досліджень [3, 6] у ковшах із переробним чавуном вже під час випуску чавуну із доменної печі формуються шлаки, що за фізико-хімічними властивостями суттєво відрізняються від доменних (табл. 1):  $B_2$  знижується, зменшується  $C_s$ , що внаслідок активного перемішування чавуну зі шлаком супроводжується приростом  $[S]_{\text{чав}}$ .

Таблиця 1. Зміна хімічного складу чавуну та шлаку при випуску із ДП (чисельник) та у чавуновізнаму ківші (знаменник) за даними А.П. Шевченко зі співавторами [3]

Меткомбінат	Вміст компонента у неметалічній частині шлаку, %							CaO /SiO <sub>2</sub>	[S], %	Δ[S], %
	SiO <sub>2</sub>	FeO	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	S			
ім. Петровського	35,06 /64,13	0,72 /5,88	51,24 /14,0	2,87 /1,15	8,83 /3,0	0,71 /7,05	2,52 /0,30	1,46 /0,22	0,029 /0,041	0,012
ДМК	37,96 /65,92	1,04 /8,08	48,26 /10,94	5,15 /2,16	7,34 /4,73	0,66 /3,35	2,01 /0,17	1,27 /0,17	0,025 /0,032	0,007
Криворіжсталь	35,86 /41,50	0,71 /0,67	48,36 /42,45	4,34 /3,77	8,94 /9,67	0,70 /0,69	2,25 /1,34	1,35 /1,02	0,074 /0,074	0
ім. Ілліча	37,30 /49,38	0,57 /1,73	46,91 /31,46	5,35 /4,69	7,0 /7,62	0,67 /1,23	2,34 /0,55	1,26 /0,63	0,024 /0,037	0,013
Запоріжсталь	38,87 /58,36	1,30 /6,62	46,16 /19,06	4,57 /2,46	6,57 /5,02	0,46 /1,20	1,69 /0,29	1,19 /0,32	0,036 /0,040	0,004
Запоріжсталь	38,30 /48,88	1,01 /3,61	45,42 /31,18	4,50 /4,13	7,12 /6,94	0,48 /0,24	1,49 /0,43	1,18 /0,64	0,060 /0,072	0,012
Запоріжсталь	39,04 /67,88	0,45 /2,68	48,14 /20,66	4,66 /2,21	6,74 /3,44	0,56 /0,32	1,67 /0,30	1,24 /0,22	0,058 /0,075	0,017

Крім підвищеного, у порівнянні з доменним, вмісту (FeO), характерним є зменшення вмісту (CaO), наявність у первинному ковшовому шлаку корольків Fe та графітової спілі [6], підвищений вміст (SiO<sub>2</sub>) та зниження  $B_2$  до 0,2—0,6 (табл. 1). Таким чином, перед початком ковшової десульфурації зазвичай від 0,2 до 2,5 т (0,1—1,25 % від маси чавуну) перехідного шлаку з доменної печі або з міксеру знаходяться на поверхні ванни. Шлаковий покрив перед десульфурацією зазвичай являє собою шлако-графіто-металевий конгломерат (ШГМК) товщиною шару у 50—250 мм, що знаходиться практично у напівтвердому стані. При подальшому транспортуванні ковшів з чавуном (зі залишками ДШ на поверхні ванни) у конвертерний цех суттєвих змін у хімічних складах як чавуну, так і шлаку не виявлено [3]. Між поверхневим шлаком, який знаходиться у твердому стані або у стані доволі в'язкого покриття, та розплавом чавуну масообмін практично не відбувається [5] до моментів переливу, зливання чавуну або проведення рафінувальних операцій.

За результатами аналізу використання у період 2015—2023 рр. впровадженої на установці десульфурації чавуну КЦ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» (далі УДЧ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ») коінжекційної технології, у першому та третьому періодах операції імпортоване флюїдизоване вапно (> 96 % CaO) вдувають крізь сопла Т-подібної заглибної фурми з інтенсивністю у середньому 42 кг/хв протягом 2—2,5 хв (20—24 % від загальних витрат). Обґрунтуванням таких витрат є необхідність забезпечення т. зв. «інкубаційного» періоду, створення умов для утримання сульфідів у шлаку та сталого характеру витоку газопорошкових струменів [7] перед включенням (у другому, основному, періоді) до складу суміші реагентів гранульованого Mg. Крім того, у зв'язку з використанням (CaO) на утворення CaS<sub>тв</sub> за рахунок взаємодії зі спливаючими до шлаку сульфідами MgS<sub>тв</sub>, насичення шлаку (CaO) сприяє зменшенню питомих витрат Mg на  $[S]_{\text{чав}}$ .

Під час інжекції вапна та магнею вглиб чавуну до вмісту первинного поверхневого шлаку додаються CaO, CaS<sub>ТВ</sub> та MgO, що змінює його фізико-хімічні властивості, у тому числі сульфідну ємність  $C_s$  та впливає на розподіл сірки  $L_s$ . Переважна частина сульфідів і оксидів, що утворилися, з часом розчиняється в шлаку, хоча значна частина CaS<sub>ТВ</sub> залишається у вигляді твердої фракції.

Розроблено багато моделей для прогнозування  $C_s$  на основі складу ковшового шлаку, переважне кількість яких побудовано із використанням оптичної основності ( $A$ ), яка раніше була визначена Duffy J.A. та Ingram M.D. (1976). Двома найбільш впливовими факторами впливу на  $C_s$  є температура і через  $A$  вміст (CaO). Зрозуміло, що для окремих обробок чавуну прогноз  $C_s$  за моделями буде відрізнятися від фактичного значення десульфурації. Так, M. Magnešöv зі співавторами (2014) відмічають, що  $C_s$ , розрахований за виразами на основі  $A$ , не може застосовуватись для процесу десульфурації на УДЧ, оскільки ковшовий шлак не є однорідним і рідким протягом певного часу операції. Це також може бути пов'язано і з помилками вимірювання, неоднорідністю шлаку, місцем відбору проби та часткою нерозчиненого CaS<sub>ТВ</sub>.

При певних складнощах визначення основності  $B2$  кількісно з наукової точки зору, емпіричне її визначення є достатнім для промислової практики. Згідно з [3] у шлаках з  $B2 < 0,93$ , що відповідає молярному співвідношенню  $CaO/SiO_2 = 1$ , утворення CaS буде уповільнено через відсутність іонів  $O^{2-}$ , які віддаються основними оксидами. Для повноти розрахунків слід також врахувати (MgO) у якості донора  $O^{2-}$  та  $Al_2O_3$  як акцептора  $O^{2-}$ . При  $B2 > 0,93$  має бути стехіометрично достатньо (CaO) для реакції з MgS<sub>ТВ</sub> та утворення CaS<sub>ТВ</sub>. Таким чином, у промислових умовах необхідним є введення у ковшовий шлак додаткової кількості CaO крім вапна, необхідного для підвищення  $B2$  вище 0,93, і вапна, необхідного для реакції утворення CaS<sub>ТВ</sub>. Введення додаткової кількості флюїдизованого вапна підвищує собівартість рафінування чавуну.

До заходів, що перешкоджають ресульфурації чавуну, відносять добавку до ковшового шлаку матеріалів, у тому числі різноманітних металургійних відходів, що містять MgO, CaO, які підвищують  $C_s$ . Так, дані [3] стосовно підвищення  $C_s$  та поверхневого натягу ( $\eta$ ) КШ при збільшенні (CaO) понад 30 % слугують обґрунтуванням як для добавок вапна при десульфурації чавуну Mg, так і для загушення кінцевого шлаку присадками відходів вапна (фракції 2–15 мм) перед його скачуванням. Згідно з дослідженням Шевченко А.Ф. зі співавторами (2015 р.) показано, що присадження CaO-містких відходів відділень обпалення вапняку у кількості 2–4 кг/т чавуну забезпечує раціональні значення інтегральних параметрів ( $\Delta e = 2-2,9$ ;  $\rho = 0,62-0,78$ ) ковшового шлаку та підвищує ефективність десульфурації чавуну магнеєм на 15–20 %.

Дослідженнями механізму рафінування залізовуглецевих розплавів підтверджено [2, 3, 6], що максимальну рідкоплинність мають легкоплавкі шлаки евтектичного складу, а їхня абсорбційна ємність залежить від ступеня структурно-хімічного розпорядження. Відомо також, що присадки MgO та  $Al_2O_3$  знижують температуру плавлення шлаків в певних інтервалах їх вмісту. Згідно з результатами аналізу [8] фаз потрійних систем CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO на полігональних діаграмах до таких віднесли вміст MgO та  $Al_2O_3$  у шлаку не більше 10–12 %. Такі шлаки плавляться при температурах рідкого чавуну, а структурне розпорядження досягається при розкисленні шлаків та активуванні їх вуглецем. У системі CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> таким умовам відповідає шлак стехіометричного складу  $6CaO \cdot 3SiO_2 \cdot Al_2O_3$  ( $54,4CaO + 29,1SiO_2 + 16,5Al_2O_3$ ) з основністю 1,87. А у системі CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO — шлак, що містить  $50,5CaO + 40,5SiO_2 + 9,0MgO$  з основністю 1,24 відповідно. При взаємодії таких шлаків утворюється легкоплавка евтектика ( $52,7CaO + 34,0SiO_2 + 9,5Al_2O_3 + 3,8MgO$ ) з основністю 1,56 та  $T_{пл} \leq 1250$  °C.

Таким чином, якщо моделі для розрахунку  $C_s$  в окремих випадках і вважаються недостатньо точними для промислового використання, отримані прогнозні значення  $C_s$  можна використовувати для визначення раціонального складу ковшового шлаку при модифікуванні останнього присадженням CaO- та  $Al_2O_3$ -містких добавок без використання додаткової кількості флюїдизованого вапна.

#### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз та теоретичне обґрунтування доцільності використання CaO- та  $Al_2O_3$ -містких відходів сталеплавильної переробки для коригування сульфідної ємності та фізико-хімічних властивостей шлаків, що формуються під час ковшової десульфурації чавуну за коінжекційною схемою на основі вапна та магнею.

### Виклад основного матеріалу

Окремі види шлакоутворюючих та розріджувачів (наприклад  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), що додають у ківш під час десульфурації, можуть сприяти збільшенню  $L_s$ , на думку А. Freismut (1998) не безпосередньо, а через ефекти «вимивання», коли сульфіді виносяться на поверхню ванни разом із утвореними рідкими шлаками. В той же час, наприкінці рафінування чавуну розрідження ковшового шлаку може стати негативним чинником з точки зору втрат заліза під час операції механічного скачування.

В основі будь-якого доменного або ковшового шлаку, які залишаються та надходять з чавуном на УДЧ є система  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ . У таких шлаках, що містять менше 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , збільшення  $B2$  від 0,6 до 1,5, а (MgO) від 0 до 20 % призводить до зростання температури плавлення ( $T_{\text{пл}}$ ) до 1350—1400 °С та зменшення інтервалу температур загушення. Шлаки стають коротшими. Згідно з дослідженнями [8, 9] при температурах нижче 1400 °С шлаки, що містять більше 25 % MgO, не текучі. Зміна вмісту (MgO) з 0 до 25 % у шлаку з  $B2=0,6\text{—}1,5$  призводить до зменшення в'язкості до певного мінімуму. Область раціонального складу таких шлаків залежить від вмісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та температури, причому у кислих шлаках зменшення в'язкості протікає інтенсивніше, ніж у основних.

Якщо відношення  $(\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3) \sim 0,5$ , то при  $B2 \sim 1,1\text{—}1,2$   $T_{\text{пл}}$  наближається до 1450 °С, зменшення  $B2 \leq 0,6$  знижує  $T_{\text{пл}}$  до 1350 °С. У таких шлаках мінімальна в'язкість змінюється від 0,4 Па·с (1500 °С) до 1,0 Па·с (1400 °С) при вмісті ( $\text{SiO}_2$ ) 34—36 %. Таким чином, у шлаках з  $B2 \leq 1,0$  вміст (MgO) може досягати 15—20 %, не викликаючи великих труднощів для формування рідкорухомих (з температурою плавлення нижче 1350 °С) шлаків.

В той же час, збільшення вмісту сірки у шлаку після десульфурації чавуну (з 0,2—1,43 до 0,65—5,89 % S) і зростанні  $L_s$  з 3,3—55 до 98—954 при недостатній величині  $B2$  створює умови для ресульфурації, особливо за сприятливих умов (вмісту  $[\text{Mg}]_{\text{розч}} < 0,005$  %, тривалому періоді очікування, переливання, зливання чавуну у конвертер та ін.). Водночас, згідно Кулікову І.С. (1986 р.), підвищення (S) призводить до зниження залежності  $T_{\text{пл}}$  від  $B2$  у певних межах.

Авторами даного дослідження з метою зниження собівартості операції десульфурації та підтримки Концепції протидії змінам клімату (ініціатива ЄС Green Deal, 2019 р.), запропоновано використання кінцевого шлаку десульфурації сталі на АКП, до складу якого входять CaO та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (далі LFi — модифікатор) як заміника додаткової кількості флюїдизованого вапна для коригування властивостей ковшових шлаків різних періодів десульфурації чавуну.

Для розрахунків та порівняльної оцінки впливу модифікаторів використали відомі з відкритих джерел хімічні склади шлаків різних підприємств: («Erdemir», Туреччина (LF1, LF3) та ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», Кам'янське (LF2)) (табл. 2).

Таблиця 2. Хімічний склад модифікаторів — кінцевих шлаків сталеплавильної переробки

Шлак-модифікатор	Вміст, %						
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	інші	основність
LF1	57,3	4,9	6,7	24,6	0,1	6,4	11,69
LF2	67	24,2	5,3	2,21	1,19	0,1	2,77
LF3	56	15,6	4,7	14,4	1,3	8	3,59

Для визначення впливу присадок модифікаторів на зміну складу й властивостей як залишків ДШ або МШ перед початком інжекції у чавун суміші вапна з магнієм та у ковшовий шлак, сформований по ходу інжекції виконали розрахунок зміни  $C_s$ , температури плавлення  $T_{\text{пл}}$ , в'язкості, плавкості, температури «хорошої» текучості модифікованих шлаків. Виходили з припущень щодо наявності на поверхні ковшової ванни на УДЧ перед інжекцією реагентів-десульфураційних залишків МШ у кількості 200—1500 кг або ДШ у кількості 400—2500 кг відповідно (0,1—1,25 % від маси чавуну).

У зв'язку з відсутністю достовірних даних стосовно зміни хімічного складу доменних шлаків під час випуску чавуну в чавуновізний ківш у доменному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» для розрахунків використані паспортні дані роботи ДП та міксерних відділень ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» (ДШ2) та «ЄМЗ» (ДШ1) (табл. 3).

Таблиця 3. Хімічний склад доменних (ДШ) та міксерних (МШ) шлаків, %

№ шлаку	Вміст, %						
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	інші	основність
ДШ1	36,1	40,5	6,0	13,7	0,7	3,0	0,89
ДШ2	48,26	39,74	5,50	5,0	1,37	0,13	1,21
МШ1	22,77	52,43	2,27	3,55	0,44	18,54	0,43
МШ2	26,42	51,41	2,72	4,68	0,96	13,81	0,51
МШ3	20,0	41,0	6,0	18,0	0,98	14,02	0,49

Згідно з розрахунками Явойського В.І. (1987 р.), під час транспортування та очікування ковшу із чавуном, на поверхню ванни спливають та залишаються в шлаку усі частинки > 50 мкм (розрахункова швидкість спливання частинок розміром 5; 40 та 100 мкм, складає 0,036; 1,8 та 18 м/год відповідно). Таким чином, наприклад, при завантаженні LFi у ківш перед заливанням (зливанням) чавуну слід очікувати утворення суміші залишків МШ або ДШ з модифікатором.

Із використанням запропонованих авторами [10–20] моделей (табл. 4) розраховано зміну  $C_s$  у залишкових обсягах ДШ, МШ і сформованих ковшових шлаках, типовий склад яких відповідає умовам роботи УДЧ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», та змінений присадженням 100–400 кг LFi різного хімічного складу (табл. 2). Моделі, що запропоновані [10–20] для розрахунку  $C_s$  на основі оптичної основності  $\Lambda$  та нестационарних температурних умов наведені у табл. 4.

Таблиця 4. Моделі для розрахунку  $C_s$  на основі оптичної основності  $\Lambda$  та для нестационарних температурних умов

№	Моделі для розрахунку сульфідної ємності шлаку, $\log(C_s)$	Джерело
1	$19,45 - \frac{11,85}{\Lambda_{corr}} + \frac{\Lambda_{corr}}{T} \frac{12410}{T} - 27109$ ; де $\Lambda_{corr} = \Lambda - 10\%$	[12]
2	$\frac{22,690 - 54,64\Lambda}{T} + 43,6\Lambda - 25,2$	[13]
3	$-13,913 + 42,84\Lambda - 23,84\Lambda^2 - \frac{11710}{T} - 0,02223X_{SiO_2} - 0,02275X_{Al_2O_3}$	[10]
4	$-6,08 + \frac{4,49}{\Lambda} + \frac{15893 + \frac{15864}{\Lambda}}{T}$	[14]
5	$0,011146\Lambda - 10,1147 \frac{1}{T} - 0,00107$	[11]
6	$12\Lambda - 11,9;$ $16,266\Lambda - 9,9405$	[15]; [20]
7	$14,20\Lambda - \frac{9894}{T} - 7,55$ ; де $\Lambda = 0,24 X_{CaO} + 0,1X_{MgO} - 0,8X_{Al_2O_3} - X_{SiO_2} + 0,67$	[17]
8	$7,663 + 94,86 \log \Lambda - \frac{10,588 + \Lambda - 339 \%MgO + 280 \%MnO}{T} +$ $+ 0,2278 \%SiO_2 + 0,1373 \%Al_2O_3 - 0,0582 \%MgO + 0,082 \%MnO$	[18]
9	$-47236,6 + \frac{52273,7\Lambda_{corr}}{T} - 19,46\Lambda_{corr} + 16,89$	[16]
10	$-5,57 + 1,39 \left( \frac{CaO + 0,7MgO}{0,94SiO_2 + 0,18Al_2O_3} \right) + 1,58 \cdot 10^{-3} T - 1500$	[22]

Для розрахунків та порівняльного аналізу використані моделі з робіт [11—14]. У запропонованих авторами робіт [15, 20] виразах не враховано вплив температури на  $C_s$ , а у моделі [22] не використовується  $A$ . Модель Y. Taniguchi зі співавторами [18] також виключено із аналізу, так як її розроблено для діапазону складів сталеплавильного шлаку, що занадто чутливо для значень  $MgO$  вище 10 % і є непридатним для звичайного складу ковшових шлаків. В моделі [22] враховано тільки вплив температури.

Результати розрахунків для ДШ2 (табл. 3), що залишається на поверхні ванни перед інжекцією десульфураторів та склад якого змінено присадженням 100—400 кг LF3 (табл. 2), представлені на рис. 1 та рис. 2.

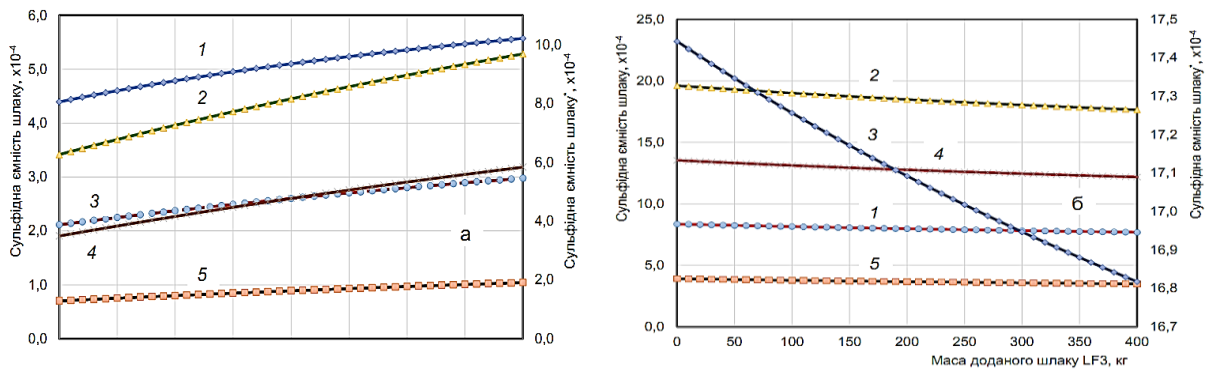


Рис. 1. Вплив на сульфідну ємність доменного шлаку (ДШ2, 800 кг), модифікованого присадженням 100—400 кг LF3 до десульфурації чавуну (а), та кінцевого ковшового шлаку, сформованого по ходу десульфурації та з добавкою 100—400 кг LF3 (б). Позначення тут і на рис. 2: розрахунок за моделями 1 — Hao X. [12]; 2 — Zhang G.H. [14]; 3 — Shankar A. [11] (вісь праворуч); 4 — Young R.W. [10]; 5 — Sosinsky D.J. [13]

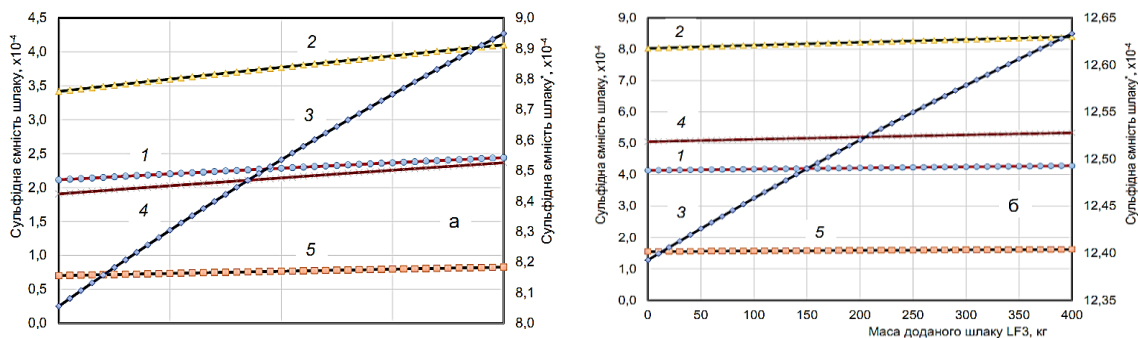


Рис. 2. Вплив на сульфідну ємність доменного шлаку (ДШ2, 2500 кг), модифікованого присадженням 100—400 кг LF3 до десульфурації чавуну (а), та кінцевого ковшового шлаку, сформованого по ходу десульфурації та з добавкою 100—400 кг LF3 (б)

Згідно з розрахунками, позитивний (рис. 1, а) з підвищенням  $C_s$ , ефект присадок LF3 у ДШ2 з залишковою масою 800 кг до початку інжекції реагентів-десульфураторів, змінюється на негативний при додаванні LF3 до об'єму сформованого кінцевого ковшового шлаку (рис. 1, б). Найменші зміни  $C_s$  спостерігаються при присажденні 100—400 кг LF3 у кінцевий ковшовий шлак, що сформовано із первинного ДШ2 (2500 кг) та внаслідок реакцій у ковшовій ванні при інжекції вапна та магнію (рис. 2, б). При цьому ефект присадок до початку інжекції реагентів-десульфураторів позитивний у всіх випадках, але визначальну роль має обсяг ДШ2 відповідного

складу (табл. 3) на поверхні ванни (рис. 2, *a*) на поверхні ковшової ванни. Подібний тренд отримано і при розрахунку зміни  $C_s$  у випадках модифікування складу ДШ1, МШ1-МШ3 (табл. 3).

Хоча використані для розрахунків моделі [10–14] і відмінність складу залишкових ДШ та МШ (табл. 3), дають різні результати впливу для типового шлаку УДЧ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», значення  $C_s$  коливаються, в межах  $1,0 \cdot 10^{-4}$ – $20,0 \cdot 10^{-4}$  при зміні температури ковшової ванни у межах 1553–1723 К та витратах  $LFi$  з різним хімічним складом (табл. 2). Вказані величини одного порядку зі  $C_s$  типових доменних шлаків системи  $CaO-SiO_2-MnO-Al_2O_3-MgO$ , що володіють підвищеною десульфуруючою здатністю.

Зниження температури ковшового шлаку по ходу проведення десульфурації є впливовим фактором зростання відсотку твердої фракції у шлаках та, відповідно, наступних втрат чавуну зі шлаком, що скачують після рафінування. Зміна кількості твердої фракції у кінцевому ковшовому шлаку на УДЧ за даними [10] та нашими розрахунками наведена на рис. 3. На рис. 3 також наведено вплив величини основності  $B_2$  шлаку на коефіцієнт розподілу сірки за даними [3, 22]. Представлені на рис. 3 залежності можуть бути використані у якості запобіжника при визначенні витрат  $LFi$  і забезпеченні заданих властивостей ковшового шлаку.

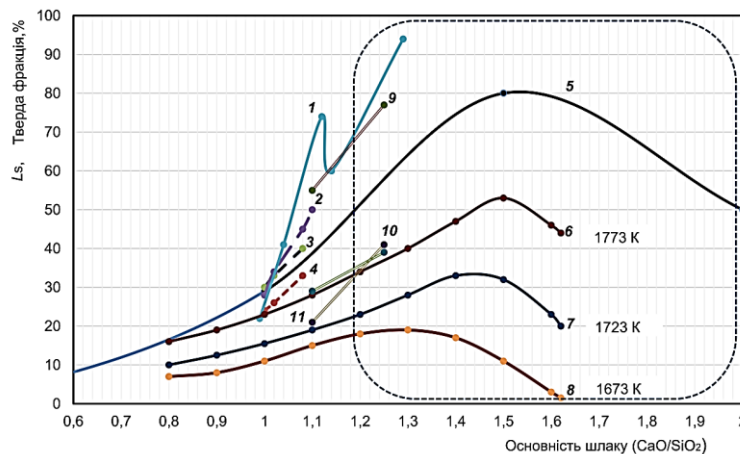


Рис. 3. Вміст твердої фракції у типовому ковшовому шлаку десульфурації чавуну ( $T_{\text{шл}}=1723$  °С) згідно з розрахунками [10] із використанням FactSage (5) та вплив основності шлаку на коефіцієнт розподілу сірки за даними: Кузнецова М.С. ( $T_{\text{шл}}=1688-1770$  К) (1); Мясоедов С.В. (2–4) та Воскобойникова В.Г. ( $T_{\text{шл}}=1673-1773$  К) (6–8); за результатами розрахунків із використанням моделі Young R.W. [10] (9), Куликова І.С. (10) та Sosinsky D.J. [13] (11)

Згідно з результатами виконаного аналізу визначено, що  $T_{\text{пл}}$  КШ, що відповідає умовам ковшової десульфурації на УДЧ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», забезпечується при концентраціях (MgO) та  $(Al_2O_3)$  на рівні 2–6 % та 6–12 % відповідно, а величина модулю  $(MgO)/(Al_2O_3)$  для шлаку з основністю 1,1–1,15 та вмістом 10 %  $Al_2O_3$  з в'язкістю нижче 0,4 Па·с — 0,5–0,64 відповідно. Склад шлаку з вказаним вмістом  $(Al_2O_3)$  вписується у фазове поле меліліту на потрібній діаграмі (Куліков І.С., 1986), має тенденцію до розміщення уздовж границі меліліт/мервинит та являє собою певний компроміс між підвищеною  $C_s$  та зниженою  $T_{\text{пл}}$ .

Вплив добавок  $LFi$  на  $T_{\text{пл}}$  з врахуванням концентраційного шляху ковшових шлаків у даній роботі досліджували із використанням діаграми температури плавлення шлаків (Куліков І.С., 1986) системи  $CaO-SiO_2-Al_2O_3$  (із врахуванням зміни вмісту (MgO), утвореного по ходу вдування реагентів). За  $T_{\text{пл}}$  прийняли температуру початку кристалізації при охолодженні розплаву шлаку. На діаграмі було виділено область обмежену лініями рівних  $T_{\text{пл}}$  (з точки зору мінімальних температур). Визначено, що для  $T_{\text{пл}}$  (< 1420 °С) раціональним можна вважати склад КШ, %: 10–52 CaO; 30–70  $SiO_2$ ; 6–40  $Al_2O_3$ .

Розраховано також зміну плавкості модифікованих присадками  $LFi$  ковшових шлаків. Для оцінки зміни плавкості шлаків використано трьохвісьову діаграму Гіббса (діаграми Г.Гау



та Л. Бабю) а також В. Г. Воскобойникова [22]. Ентальпію шлаку визначали з використанням виразу [23], кДж/кг:

$$Q = m \cdot c \cdot T, \quad (1)$$

де  $m$  — маса, кг;  $c$  — середня питома теплоємність в інтервалі від 293 К до  $T$ ;  $T$  — температура, для якої визначена ентальпія, К.

Питома теплоємність шлаків (для діапазону температур 1550—1640 К) визначали за виразом В. Г. Воскобойникова [22], кДж/(кг·К):

$$c = 0,63 \cdot 10^{-2} T - 2,0 \cdot 10^{-6} T^2 - 3,67 + 0,067 \cdot (1 - (\text{CaO} / \Sigma_{\text{оксидів}})). \quad (2)$$

Згідно з розрахунками змін хімічного складу КШ по ходу дування реагентів-десульфураторів визначено, що з точки зору мінімізації витрат тепла на розплавлення шлаку, до раціонального складу КШ можна віднести наступний, %: 37—55 CaO; 33—51 SiO<sub>2</sub>; 5—24 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Необхідно відмітити, що практичне значення має не тільки температура плавлення модифікованого ковшового шлаку, а і його в'язкість (0,3—0,8 Па·с). Раціональний склад КШ доцільно визначати також із врахуванням необхідності мінімізації в'язкості (прийнятий для розрахунків діапазон в'язкості 0,06—0,5 Па·с) та забезпечення достатньо низької  $T_{\text{пл}}$ . У зв'язку із чим, використали діаграму для в'язкості алюмосилікатів кальцію (при 1673 К) із роботи [22]. Необхідно відмітити, що вміст як (SiO<sub>2</sub>), так і (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) можуть коливатись в широкому діапазоні > 33 % не суттєво впливаючи на в'язкість шлаку. Кількість (CaO) може коливатись у вузькому діапазоні ~ 13 %, при цьому за вмісту (CaO) < 40 % в'язкість шлаку > 0,8 Па·с підвищується на 0,2 Па·с на 1 % зменшення вмісту (CaO). З іншої сторони, при зростанні вмісту (CaO) понад 50 % шлак стає нестійким, із підвищенням в'язкості ще більш швидкими темпами (> 0,3 Па·с/1 % збільшення вмісту (CaO)). Визначено, що до раціонального складу КШ для умов УДЧ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» можна віднести наступний, %: 38—51 CaO; 36—51 SiO<sub>2</sub>; 5—21 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Для визначення хімічного складу ковшового шлаку, що відповідає усім перерахованим вище вимогам, застосували метод лінійного програмування (геометричним методом за методикою, описаною в роботі [23]). Визначені області оптимальних складів КШ розмістили на одній діаграмі (рис. 4).

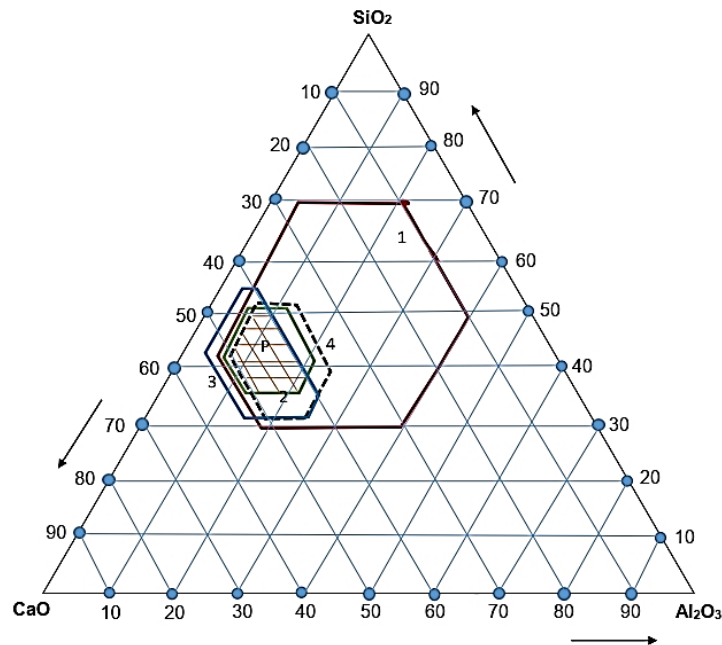


Рис. 4. Розташування зони  $P$  раціонального хімічного складу модифікованого присадками LFi ковшового шлаку із врахуванням оптимальних діапазонів  $T_{\text{пл}}$  (1), «хорошої» текучості (2), в'язкості (3) та плавкості (4) шлаку

Згідно з даними рис. 4 усі чотири оптимальні області: 1 —  $T_{пл}$ ; 2 — «хорошої» текучості шлаку; 3 — в'язкості шлаку та 4 — плавкості шлаку при перетині утворюють загальну область  $P$ , із вмістом, %: 40—51 CaO; 36—51 SiO<sub>2</sub>; 6—21 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Склад модифікованого ковшового шлаку з області  $P$  (рис. 4) та  $B_2 = 1,11-1,41$  можна вважати таким, що задовольняє заданому діапазону обраних металургійних властивостей.

#### Висновки

Покривні ковшові шлаки, що сформовані із залишків доменних або міксерних шлаків та продуктів хімічних реакцій видалення сірки шляхом інжекції сумішей на основі вапна та магнею, потребують коригування у напрямках підвищення сульфідної ємності при одночасному розрідженні для запобігання надмірних втрат заліза зі шлаком. Використання додаткової кількості флюїдизованого вапна для коригування фізико-хімічних властивостей шлаків призводить до підвищення собівартості обробки. Запропоновано використання модифікатора шлаку на основі CaO- та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-містких відходів сталеплавильної переробки для зменшення витрат флюїдизованого вапна. Визначені раціональні питомі витрати модифікаторів в залежності від вихідного складу ковшових шлаків та розраховано зміну їх сульфідної ємності з використанням моделей на основі концепції оптичної основності. Визначено зміну плавкості, в'язкості, температури плавлення модифікованих ковшових шлаків та досліджений концентраційний шлях модифікованих добавками CaO- та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-містких відходів.

Показано, що для типового складу ковшового шлаку УДЧ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», значення сульфідної ємності коливаються в межах  $1,0 \cdot 10^{-4}$ — $20,0 \cdot 10^{-4}$ , що відповідає доменним шлакам системи CaO—SiO<sub>2</sub>—MnO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—MgO з підвищеною десульфуруючою здатністю. Визначено зміну кількості твердої фракції у кінцевому шлаку УДЧ по ходу рафінування та вплив основності модифікованого шлаку на коефіцієнт розподілу сірки у нестационарних температурних умовах. Зі застосуванням методу лінійного програмування визначений діапазон раціонального хімічного складу ковшового шлаку для умов УДЧ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Модифікований ковшовий шлак з основністю 1,11—1,41 та вмістом 40—51 % CaO; 36—51 % SiO<sub>2</sub> та 6—21 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> запропоновано вважати таким, що задовольняє заданому діапазону обраних металургійних властивостей.

#### Список використаної літератури

1. Fincham C.J.B, Richardson F.D. The behaviour of sulphur in silicate and aluminate melts. *Proc. R. Soc. London*. 1954. 223(A). Pp. 40—62.
2. Сігарьов Є.М., Похвалітій А.А., Довженко О.В., Ісаков В.Н. Закономірності масообміну між ковшовою ванною та покривним шлаком. *Збірник наукових праць Дніпровського технічного університету: (технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ, вип. 2(33). 2018. С. 3—8.
3. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология, исследования, анализ, совершенствование. А.Ф. Шевченко, І.О. Маначин, О.С. Вергун та ін. *Д.: Дніпро-VAL.*, 2017. 251 с.
4. Frank N. H. Schrama, Elisabeth M. Beunder, Sourav K. Panda et al. Optimal hot metal desulphurisation slag considering iron loss and sulphur removal capacity. *Ironmaking & Steelmaking*. 2021. Pp. 1—13.
5. В. Домальски, К. Фабиан, Д. Нолле. Внедоменная десульфурация чугуна. *Черные металлы*. 1968. №17. С. 9—18.
6. Особенности шлакообразования в ковшах с жидким чугуном. Н.Т. Ткач, А.Ф. Шевченко, Д.В. Костенко, П.С. Лындя. *Сб. науч. тр. ИЧМ*. 2002. С. 167—174.
7. Єськов Д.В., Сігарьов Є.М. Параметри вдування реагентів та закупорювання Т-подібних наконечників фурм / *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське: ДДТУ. 2024. №1(44). С. 16—26.
8. Kou M., Wu S., Ma X., Wang L., et al. Phase equilibrium studies of CaO—SiO<sub>2</sub>—MgO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system with binary basicity of 1.5 related to blast furnace slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. №47(2). Pp. 1093—1102.

9. Liu Y., Lu X.W., Li B., Bai C.G. Relationship between structure and viscosity of CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO–30.00 wt.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag by molecular dynamics simulation with FT-IR and Raman spectroscopy. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. 45(6). 492—501.
10. Young R.W., Duffy J.A., Hassal G.J. et al. Use of the optical basicity concept for determining phosphorus and sulphur slag-metal partitions. *Ironmaking & Steelmaking*. 1992. №19(3). Pp. 201—219.
11. Shankar A., Görnerup M., Lahiri A.K., et al. Sulfide capacity of high alumina blast furnace slags. *Metall Mater Trans B*. 2006. №37B. Pp. 941—947.
12. Hao X., Wang X. A new sulfide capacity model for CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–MgO slags based on corrected optical basicity. *Steel Research International*. 2016. №87(3). Pp. 359—363.
13. Sosinsky D.J., Duffy J.A. The composition and temperature dependence of the sulfide capacity of metallurgical slags. *Metall Mater Trans B*. 1986. №17(2). Pp. 331—337.
14. Zhang G.H., Chou K.C., Pal U. Estimation of sulfide capacities of multicomponent slags using optical basicity. *ISIJ International*. 2013. №53(5). Pp. 761—767.
15. Duffy J.A. & Ingram M.D., 1976. An interpretation of glass chemistry in terms of the optical basicity concept. *Journal of Non-Crystalline Solids*. №21(3). Pp. 373—410.
16. Andersson M.A.T., Jönsson P.G., Hallberg M. Optimisation of ladle slag composition by application of sulphide capacity model. *Ironmaking & Steelmaking*. 2000. №27(4). P. 286—293.
17. Diao J., Xie B. & Wang S.S. Research on slag modifying agents for CaO–Mg based hot metal desulphurisation. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009. №36(7). Pp. 543—547.
18. Y. Taniguchi, N. Sano & S. Seetharaman. Sulphide Capacities of CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–MgO–MnO Slags in the Temperature Range 1673–1773K. *ISIJ International*. 2009. February. Pp. 81—99.
19. Young D.Y., Cripps Clark C.J. Sulphur partition in blast furnace hearth. *Ironmaking and Steelmaking*. 1980. №5. P. 209.
20. Сарекенов К.З., Акбердин А.Л. Серопоглощительная способность доменных шлаков / Теория и практика производства чугуна: Сб. трудов международной научно-технической конференции. Кривой Рог: КГГМК «Криворожсталь», 2004. С. 301—304.
21. Frank N.H. Schrama, Fuzhong Ji, Adam Hunt et al. Lowering iron losses during slag removal in hot metal desulphurisation without using fluoride. *Ironmaking & Steelmaking*. 2020. №47(5). Pp. 464—472.
22. Свойства жидких доменных шлаков. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г. и др. *Металлургия*, 1975. 184 с.
23. Ковшов В.Н., Петренко В.А., Верещак В.И. Оптимизация доменного процесса. *Днепропетровск: Арт-Пресс*, 1977. 108 с.

## SULFIDE CAPACITY AND PROPERTIES MODIFIED LADLE SLAGS

### Abstract

Ladle slag during the entire period of iron refining must have a sufficient degree of ability to hold sulfides while simultaneously ensuring the minimization of iron losses. In ladles with recycled cast iron entering the desulphurization department, slags are formed already during the release of cast iron from the blast furnace or pouring from the mixer, which differ significantly from blast furnace slag in terms of physical and chemical properties. The basicity and sulphide capacity of slags decreases, which due to their active mixing with cast iron is accompanied by an increase in sulfur in the metal. The composition of slags, formed from the remains of blast furnace or mixer slags and products of chemical reactions of sulfur removal by injection of mixtures based on lime and magnesium, needs adjustment to increase the sulfide capacity while simultaneously thinning them to prevent excessive losses of iron with the slag. The use of an additional amount of fluidized lime for adjustment leads to an increase in the processing cost. It is proposed to use a slag modifier based on CaO- and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-containing steel processing waste to reduce the costs of fluidized lime. The rational specific consumption of modifiers was determined depending on the initial composition of ladle slags and the change in their sulfide capacity was calculated using models based on the concept of optical basicity. The change in melting point, viscosity, and melting point of modified ladle slags was determined, and the concen-

tration path of CaO- and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-containing waste modified with additives was investigated. It is shown that for the typical composition of the ladle slag of cast iron desulfurization plant of PrJSC «KAMET-STAL», sulfide capacity values range from  $1.0 \cdot 10^{-4}$  to  $20.0 \cdot 10^{-4}$ , which corresponds to blast furnace slags of the CaO–SiO<sub>2</sub>–MnO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO system with increased desulfurizing ability. The change in the amount of the solid fraction in the final slag in the course of refining and the effect of the basicity of the modified slag on the sulfur distribution coefficient in non-stationary temperature conditions were determined. With the application of the linear programming method, the range of rational chemical composition of ladle slag for the conditions of cast iron desulfurization plant of PrJSC «KAMET-STAL» was determined. Modified ladle slag with a basicity of 1.11—1.41 and a content of 40—51 % CaO; 36—51 % SiO<sub>2</sub> and 6—21 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are proposed to be considered as satisfying the given range of selected metallurgical properties.

### Referenses

- [1] Fincham, C.J.B, Richardson, F.D. (1954). The behaviour of sulphur in silicate and aluminate melts. *Proc. R. Soc. London*, 223(A), 40—62.
- [2] Sigarev, E., Pochvalyiti, A., Dovzhenko, O., Isakov, V. (2018). Patterns of mass transfer between the ladle bath and the covering slag. *Collection of scientific works of the Dnipro Technical University: (technical sciences)*. Kamianske: DSTU, 2(33), 3—8. [in Ukrainian].
- [3] Special desulfurization of cast iron in ladles. (2017). Technology, research, analysis, improvement. Shevchenko, A., Manachin, I., Vergun, O. et al. *Dnipro: Dnipro-VAL* [in Russian].
- [4] Frank N.H., Schrama, Elisabeth, M., Beunder Sourav K., Panda a.o. (2021). Optimal hot metal desulphurisation slag considering iron loss and sulphur removal capacity. *Ironmaking & Steelmaking*, 1—13.
- [5] Domalsky, V., Fabian, K., Nolle, D. (1968). Unburnt desulfurization of cast iron. *Stahl und Eisen*, 17, 9—18. [in Russian].
- [6] Tkach, N., Shevchenko, A., Kostenko, D., Lindya, P. (2002). Features of slag formation in ladles with liquid cast iron. *Collection of scientific papers of the Institute of Ferrous Metallurgy*, 167—174. [in Russian].
- [7] Yeskov, D., Sigarev, E. (2024). Parameters of blowing of reagents and clogging of T-shaped nozzle lances / *Collection of scientific works of the Dnipro Technical University: (technical sciences)*. Kamianske: DSTU, 1(44), 16—26. [in Ukrainian].
- [8] Kou, M., Wu, S., Ma, X. et al. (2016). Phase equilibrium studies of CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system with binary basicity of 1.5 related to blast furnace slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(2), 1093—1102.
- [9] Liu, Y., Lu, X.W., Li, B., Bai, C.G. (2018). Relationship between structure and viscosity of CaO–SiO<sub>2</sub>–MgO–30.00 wt. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slag by molecular dynamics simulation with FT-IR and Raman spectroscopy. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(6), 492—501.
- [10] Young, R.W., Duffy, J.A., Hassal, G.J. et al. (1992). Use of the optical basicity concept for determining phosphorus and sulphur slag-metal partitions. *Ironmaking & Steelmaking*, 19(3), 201—219.
- [11] Shankar, A., Görnerup, M., Lahiri, A.K. a.o. (2006). Sulfide capacity of high alumina blast furnace slags. *Metall Mater Trans B*, 37B, 941—947.
- [12] Hao, X., Wang, X. (2016). A new sulfide capacity model for CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–MgO slags based on corrected optical basicity. *Steel Research International*, 87(3), 359—363.
- [13] Sosinsky, D.J., Duffy, J.A. (1986). The composition and temperature dependence of the sulfide capacity of metallurgical slags. *Metall Mater Trans B*, 17(2), 331—337.
- [14] Zhang, G.H., Chou, K.C., Pal, U. (2013). Estimation of sulfide capacities of multicomponent slags using optical basicity. *ISIJ International*, 53(5), 761—767.
- [15] Duffy, J.A. & Ingram, M.D. (1976). An interpretation of glass chemistry in terms of the optical basicity concept. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 21(3), 373—410.
- [16] Andersson, M.A.T., Jönsson, P.G., Hallberg, M. (2000). Optimisation of ladle slag composition by application of sulphide capacity model. *Ironmaking & Steelmaking*, 27(4), 286—293.

- [17] Diao, J., Xie, B. & Wang, S.S. (2009). Research on slag modifying agents for CaO-Mg based hot metal desulphurisation. *Ironmaking & Steelmaking*, 36(7), 543—547.
- [18] Taniguchi, Y., Sano, N., Seetharaman S. (2009). Sulphide Capacities of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO-MnO Slags in the Temperature Range 1673-1773K. *ISIJ International*, February, 81—99.
- [19] Young, D.Y., Cripps, Clark C.J. (1980). Sulphur partition in blast furnace hearth. *Ironmaking and Steelmaking*, 5, 209.
- [20] Sarekenov, K., Akberdin A. (2004). Sulfur absorption capacity of blast furnace slags / Theory and practice of iron production: *Collection of works of the international scientific and technical conference. Krivoy Rog: KGMK Krivorozhstal*, 301—304. [in Russian].
- [21] Frank N.H., Schrama, Fuzhong, Ji, Adam, Hunt et al. (2020). Lowering iron losses during slag removal in hot metal desulphurisation without using fluoride. *Ironmaking & Steelmaking*, 47(5), 464—472.
- [22] Voskoboinikov, V., Dunaev, N., Mikhalevich, A., et. al. (1975). Properties of liquid blast furnace slags. *Metallurgy*. [in Russian].
- [23] Kovshov, V., Petrenko, V., Vereshchak, V. (1977). Optimization of the blast furnace process. *Dnepropetrovsk: Art-Press*. [in Russian].

Надійшла до редколегії 27.09.2024