

МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.1

УДК 669.162.286

Кисляков В.Г.¹, к.т.н., ORCID: 0000-0002-1775-5050, ovoch-isi@outlook.com

Молчанов Л.С.¹, к.т.н., ORCID: 0000-0001-6139-5956, metall729321@gmail.com

Маначин І.О.¹, к.т.н. ORCID: 0000-0001-9795-6751, ovoch-isi@outlook.com

Похвалітій А.А.², к.т.н., ORCID: 0000-0001-7887-2843, доцент, e-mail: artemmslp@gmail.com

Чубіна О.А.², к.т.н., ORCID: 0000-0003-2213-5013, доцент, e-mail: ms.chubina@ukr.net

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро

²Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kislyakov Volodymyr, Candidate of Technical Sciences, Head of the Out-of-Furnace Cast Iron Processing Department

Molchanov Lavr, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy

Manachyn Ivan, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist, Senior Researcher Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

Pokhvalityi Artem, Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure

Chubina Olena, Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure

Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dnipro
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РЕАГЕНТІВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ ЧАВУНУ

Метою даної роботи є узагальнення результатів застосування різних реагентів для комплексного видалення домішок з рідкого чавуну. Випробувано використання плаву соди як реагенту на промисловому рівні в 140-тонному чавуновозному ковші, а також наведено результати експериментальних обробок. Розглянуто технологію комплексного рафінування чавуну з використанням системи реагентів $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3$, яка базується на взаємодії зазначених компонентів із рідким чавуном. Описано можливі хімічні перетворення, що відбуваються під час введення цих реагентів, зокрема реакції десульфурзації, окиснення та видалення шкідливих домішок. За результатами лабораторних досліджень на «гарячій» моделі було проведено аналіз поведінки домішок та побудовано картограми впливу компонентів реагентів на видалення фосфору, сірки та кремнію. Також побудовано потрійні діаграми стану для системи $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3$, що дозволило зробити висновки щодо оптимальних умов для комплексного рафінування чавуну.

Ключові слова: чавун; реагент; домішки; позапічна обробка; порівняння.

The aim of this work is to summarize the results of using various reagents for the comprehensive removal of impurities from molten cast iron. The use of soda slag as a reagent was tested at the industrial level in a 140-ton hot metal ladle, and the results of experimental treatments were presented. A technology for comprehensive cast iron refining using the $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3$ reagent system was considered, which is based on the interaction of these components with molten cast iron. Possible chemical transformations occurring during the introduction of these reagents were described, including desulfurization reactions, oxidation, and the removal of harmful impurities. Based on laboratory studies using a "hot" model, an analysis of impurity behavior was conducted, and influence maps of the reagents' components on phosphorus, sulfur, and silicon removal were constructed. Additionally, ternary phase diagrams for the $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3$ system were developed, which helped to determine optimal conditions for comprehensive cast iron refining.

Keywords: cast iron; reagent; impurities; out-of-furnace treatment; comparison.

Постановка проблеми

Киснево-конвертерний спосіб одержання сталі являє собою швидкоплинний процес, у якому операції з рафінування металу певною мірою обмежені. Оскільки основну масу домішок у ванну конвертера вносить чавун, то доцільно перенести операцію з рафінування в чавуновозний або заливальний ківш. Також очищення чавуну від домішок раціонально проводити на тому металургійному переділі, де це вигідніше термодинамічно і пов'язано з меншими ресурсо- та енерговитратами. Для реалізації технології комплексної обробки чавуну важливе значення має науково обгрунтований вибір реагенту. Використання комплексно рафінованого чавуну дасть змогу поліпшити показники киснево-конвертерної плавки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На різних металургійних підприємствах залежно від цін, що склалися, на знесірчувальні реагенти, а також залежно від необхідної глибини десульфурації, сортаменту металопродукції, що виготовляється, умов для реалізації технології, використовують різні способи десульфурації з використанням різних реагентів (вапна, карбїду кальцію, магнію, соди або їх суміші). [1—6].

Після вирішення проблеми видалення сірки з чавуну в металошихті конвертерної плавки залишається один елемент — фосфор, наявність якого зумовлює необхідність наведення основного шлаку в сталеплавильному агрегаті. Створення ефективної технології очищення чавуну від домішок дає змогу звільнити сталеплавильний агрегат від операцій з рафінування металу, що, зрештою, призведе до скорочення витрат вапна, кисню та металошихти, підвищення продуктивності агрегатів і підвищення якості сталі. [7].

Принципово можливими є два напрямки позапечної дефосфорації залізобуглецевих розплавів: відновлювальна й окислювальна. Процес відновлювальної дефосфорації може здійснюватися за низького парціального тиску кисню (10^{-13} Па і нижче) флюсами типу $\text{CaF}_2\text{-CaC}_2$, Ca-CaF_2 або чистим кальцієм та його карбїдом CaC_2 з утворенням у результаті взаємодії сполук типу Ca_3P_2 . [8—10].

Ширшого розвитку (порівняно з відновлювальною) набула окислювальна дефосфорація. В основі процесу окислювальної дефосфорації залізобуглецевого розплаву лежить вплив на метал кисню з утворенням у результаті цього впливу оксиду фосфору P_2O_5 , який потім зв'язується основними оксидами в стійкі сполуки на кшталт $\text{CaO-P}_2\text{O}_5$ або $\text{Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ і переходить у шлак.

Комплексне рафінування рідкого чавуну може проходити за двома наступними схемами:

- зменшення концентрації сірки, фосфору та кремнію. Ця схема характерна для малощлакової технології виплавки сталі у кисневих конвертерах;
- видалення сірки та фосфору з розплаву. Ця схема характерна для здійснення процесів виплавки сталі у кисневих конвертерах з підвищеною часткою металобрухту у шихті без заміни продувного пристрою.

Для сучасних умов українського металургійного виробництва більш актуальним є другий варіант, проте на етапі повоєнного відновлення необхідно буде реалізувати саме перший варіант технології, оскільки він дозволяє виробляти більш конкурентоспроможну металопродукцію.

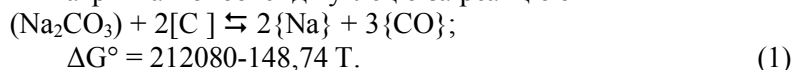
Формулювання мети дослідження

Метою роботи є узагальнення даних щодо застосування різних реагентів при реалізації комплексного видалення домішок з рідкого чавуну.

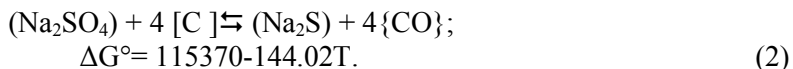
Виклад основного матеріалу

Для першої технології, що розглядається, на основі виконаного термодинамічного аналізу у якості базового компонента шлакоутворювальної суміші випробували плав соди, що утворюється при виробництві капролактаму. Цей матеріал містить 60—70 % карбонату натрію та 30—40 % сульфату натрію.

Виконані розрахунки дозволили встановити, що при взаємодії вуглецю з содою відбувається її розкладання на газоподібний натрій та монооксид вуглецю за реакцією



Виконаний термодинамічний розрахунок для системи, де є сульфат натрію і вуглець, показав, що розкладання сульфату натрію вуглецем відбувається з утворенням сульфїду натрію і монооксиду вуглецю за реакцією



Na₂O-вмісні шлаки є системами, що легко випаровуються, тому було виконано термодинамічний аналіз процесів випаровування таких систем.

Встановлено, що основними компонентами газової фази, рівноважної над рідким Na₂O-вмісним шлаком, при температурі 1300—1400 °C, є газоподібний натрій і кисень.

Промислове випробування плаву соди як реагенту для комплексної обробки чавуну було виконано в умовах українського металургійного комбінату.

Обробку здійснювали подачею порції реагенту "під струмінь" при випуску чавуну в 140-т чавуновозний ківш. Було проведено дві експериментальні обробки, результати яких представлено в табл. 1. При питомій масовій витраті реагенту на обробку 17,5 кг/т (експериментальна обробка № 1) з чавуну одночасно видалено 57 % S та 37 % N. Оскільки при цьому було окислено всього 6,3 % Si (а залишковий вміст кремнію в чавуні залишався на рівні 0,89 %), то вміст фосфору в чавуні не змінився.

Таблиця 1. Результати обробки чавуну плавом соди в 140-т чавуновозних ковшах

Номер обробки	Витрати реагенту, кг/т	Хімічний склад, % (до/після обробки)					Ступінь видалення, %		
		C	Mn	Si	S	P	Ст.Si	Ст.S	Ст.P
1	17,5	4,72	0,34	0,95	0,028	0,045	6,3	57,0	0
		4,65	0,31	0,89	0,012	0,045			
2	32,7	4,78	0,33	1,10	0,022	0,047	42,0	72,0	12,8
		4,62	0,28	0,64	0,006	0,041			

Збільшення питомої масової витрати реагенту до 32,7 кг/т дозволило знизити вміст кремнію в чавуні до 0,64 %. За такого залишкового вмісту кремнію в чавуні спостерігалася незначна дефосфорація, що становила 12,8 %. Ступінь десульфурації чавуну у цьому випадку досягла 72 %.

Результати промислового випробування плаву соди як реагенту для комплексного рафінування чавуну підтвердили принципову придатність цього матеріалу для одночасного (при досягненні певних умов) видалення з чавуну сірки, кремнію, фосфору. Отримані результати лабораторних та промислових досліджень показали, що багатостадійний варіант видалення шкідливих домішок протягом технологічної ланки "позапічна обробка чавуну – киснево-конвертерний цех" дозволяє виконувати першочергове видалення сірки реагентом для десульфурації та подальше видалення кремнію та фосфору у ванні конвертера. Під час постановки завдання додаткового видалення кремнію на етапі позапічної обробки необхідно визначитися з вибором реагентів та технологічних підходів.

Наступна технологія, яка розглядалася, застосовується для проведення комплексного рафінування чавуну, базується на застосуванні реагентів системи CaO-FeO-Na₂CO₃. Розглянуто можливі хімічні перетворення, що можуть відбуватися при введенні цих реагентів у рідкий чавун. До них належать реакції десульфурації, дисоціації карбонатів, окиснення домішок чавуну внаслідок взаємодії з вуглекислим газом, а також реакції взаємодії компонентів рідкого чавуну з оксидами заліза. Відповідні хімічні рівняння та вирази для розрахунків наведені у табл. 2.

Таблиця 2. Реакції хімічних перетворень та вирази для розрахунку [11]

Реакції десульфурації		
№	Хімічна реакція	Рівняння для розрахунку константи рівноваги в залежності від температури
1.	$2\langle\text{CaO}\rangle + [\text{S}] + 1/2[\text{Si}] = (\text{CaS}) + 1/2\langle 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rangle$	$\lg K_p = 11800/T - 3,9$
2.	$\langle \text{Na}_2\text{CO}_3 \rangle + [\text{S}] + [\text{Si}] = (\text{Na}_2\text{S}) + \{\text{CO}\} + \text{SiO}_2$	$\lg K_p = 1777,38/T - 0,109$
3.	$\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + [\text{C}] = (\text{CaS}) + \{\text{CO}\}$	$\lg K_p = -3860/T + 3,29$
4.	$\langle \text{Na}_2\text{CO}_3 \rangle + [\text{S}] + 2[\text{C}] = (\text{Na}_2\text{S}) + 3\{\text{CO}\}$	$\lg K_p = -623,29/T + 4,98$
5.	$\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + [\text{Mn}] = (\text{CaS}) + (\text{MnO})$	$\lg K_p = 23400/T - 11,58$
6.	$\langle \text{CaO} \rangle + [\text{S}] + [\text{Fe}] = (\text{CaS}) + (\text{FeO})$	$\lg K_p = 16960/T - 8,63$
Реакції дисоціації карбонатів		
1.	$\langle \text{Na}_2\text{CO}_3 \rangle = \{\text{CO}_2\} + \langle \text{Na}_2\text{O} \rangle$	$\lg K_p = -9911/T + 32,77$
2.	$\langle \text{CaCO}_3 \rangle = \{\text{CO}_2\} + \langle \text{CaO} \rangle$	$\lg K_p = -47265/T + 39,95$
Окислення домішок чавуну за рахунок взаємодії з вуглекислим газом		
1.	$2\{\text{CO}_2\} + [\text{Si}] = 2\{\text{CO}\} + (\text{SiO}_2)$	$\lg K_p = 13824/T - 2,61$
2.	$\{\text{CO}_2\} + [\text{Fe}] = \{\text{CO}\} + (\text{FeO})$	$\lg K_p = -2128/T + 1,85$
3.	$\{\text{CO}_2\} + [\text{Mn}] = \{\text{CO}\} + (\text{MnO})$	$\lg K_p = 4312/T - 1,1$
4.	$5\{\text{CO}_2\} + 2[\text{P}] = 5\{\text{CO}\} + (\text{P}_2\text{O}_5)$	$\lg K_p = -5388/T + 6,17$
5.	$\{\text{CO}_2\} + [\text{C}] = 2\{\text{CO}\}$	$\lg K_p = -7288/T + 6,58$
Взаємодія компонентів рідкого чавуну з оксидами заліза		
1.	$2[\text{P}] + 5(\text{FeO}) + 4(\text{CaO}) = (4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5) + 5[\text{Fe}]$	$\lg K_p = 44690/T - 18,26$
2.	$2(\text{FeO}) + [\text{Si}] = (\text{SiO}_2) + 2[\text{Fe}]$	$\lg K_p = 18080/T - 6,31$
3.	$(\text{FeO}) + [\text{Mn}] = (\text{MnO}) + [\text{Fe}]$	$\lg K_p = 6440/T - 2,95$
4.	$(\text{FeO}) + [\text{C}] = (\text{CO}) + [\text{Fe}]$	$\lg K_p = -5160/T + 4,73$

Аналіз отриманих виразів дозволив зробити наступні висновки. Найефективніше процес десульфурації відбувається при використанні карбонату натрію (Na_2CO_3) як основного реагенту. В даному випадку вуглець чавуну виступає відновником, що є значною перевагою для процесу комплексного рафінування від сірки та фосфору без екстракції кремнію. Процеси дисоціації є пріоритетними як для карбонату натрію, так і для карбонату кальцію (CaCO_3). Після дисоціації у подальших реакціях рафінування беруть участь оксиди натрію та кальцію, а також вуглекислий газ (CO_2). Для процесів класичного комплексного рафінування CO_2 має позитивний вплив, оскільки активно окислює кремній у складі чавуну. Однак для видалення сірки та фосфору його наявність є небажаною. Тому, для зниження негативного впливу CO_2 на ефективність рафінування до складу реагенту слід ввести додатковий сильний відновник, такий як алюміній.

Реагенти системи CaO-FeO пріоритетно вступають у хімічну взаємодію з фосфором у складі рідкого чавуну, забезпечуючи ефективно видалення фосфору.

Таким чином, термодинамічні розрахунки показали, що суміш для комплексного рафінування рідкого чавуну на етапі позапічної обробки повинна належати до хімічної системи $\text{CaO-Na}_2\text{CO}_3\text{-FeO(Fe}_2\text{O}_3\text{)-Al}$.

У лабораторних умовах на «гарячій» моделі було проведено серію експериментальних обробок чавуну, спрямованих на видалення домішок. Реагенти вводили в об'єм рідкого чавуну за допомогою спеціального пристрою. В якості реагентів використовували CaO , FeO , Na_2CO_3 та Al , які вводили або окремо, або у заданих співвідношеннях для оцінки їх ефективності. Через 10 хвилин після введення реагентів проводився відбір кінцевої проби чавуну для подальшого хімічного аналізу.

Результати обробок зведені до табл. 3, в якій відображається вплив кожного реагенту або їх комбінацій на хімічний склад чавуну після обробки, включаючи вміст кремнію, фосфору та сірки. Це дозволяє визначити оптимальні умови для комплексного рафінування чавуну та оцінити ефективність різних реагентів і їх комбінацій.

Табл. 3 містить підсумкові дані щодо кожної обробки, що дає змогу наочно проаналізувати результати проведених досліджень.

Таблиця 3. Технологічні параметри лабораторних обробок та дані хімічного аналізу вихідних і кінцевих проб чавуну

Пл. №	Вага чавуну, г	Компоненти суміші, %				Температура чавуну, °С	Хімічний аналіз чавуну, %			Ступінь видалення, %		
		CaO	FeO	Na ₂ CO ₃	Al		Si _{вих.} / Si _{кін.}	S _{вих.} / S _{кін.}	P _{вих.} / P _{кін.}	Ст.Si	Ст.S	Ст.P
1	1285	-	100	-	-	1490	1	0,042	0,025	16	7	20
							0,84	0,039	0,02			
2	1255	50	50	-	-	1440	1,1	0,049	0,028	7	-4	29
							1,02	0,051	0,02			
3	1285	-	-	100	-	1370	0,94	0,037	0,035	13	14	14
							0,82	0,032	0,03			
4	1290	-	50	50	-	1380	0,78	0,052	0,03	5	15	10
							0,74	0,044	0,027			
5	1215	50	-	50	-	1360	0,93	0,037	0,03	9	22	3
							0,85	0,029	0,029			
6	1295	33,3	33,3	33,3	-	1410	0,66	0,047	0,036	6	21	17
							0,62	0,037	0,03			
7	1245	42	42	16	-	1360	0,97	0,04	0,032	6	18	22
							0,91	0,033	0,025			
8	1235	16	42	42	-	1450	0,72	0,049	0,035	6	18	11
							0,68	0,04	0,031			
9	1240	42	16	42	-	1440	0,82	0,046	0,034	7	20	6
							0,76	0,037	0,032			
10	1220	26,5	26,5	26,5	20	1360	0,98	0,05	0,028	9	48	14
							0,89	0,026	0,024			

За результатами виконаних обробок проведено детальний аналіз поведінки домішок у чавуні. Побудовано потрійні діаграми стану, що ілюструють вплив трьох компонентів системи CaO-FeO-Na₂CO₃, а також вплив від додавання алюмінію на ступінь видалення сірки, кремнію та фосфору. На рис. 1 наведені діаграми стану для видалення кремнію, сірки та фосфору, які показують взаємодію компонентів і їхній вплив на рафінування чавуну.

На рис. 2 та рис. 3 наведено діаграми стану для видалення кремнію, сірки та фосфору при попередньому розкисленні алюмінієм, відповідно 25 % і 50 % від загальної маси суміші. Обробка чавуну сумішшю CaO-FeO-Na₂CO₃-Al показала її ефективність для комплексного видалення домішок, таких як сірка, кремній та фосфор, що підтверджує придатність цієї суміші для промислового застосування. Однак слід відзначити, що збільшення кількості алюмінію призводить до погіршення показників рафінування від кремнію та фосфору.

Запропонований підхід дозволяє точно підібрати склад реагентів для досягнення максимального очищення чавуну залежно від вимог до кінцевого продукту.

Висновки

Результати промислового випробування використання плаву соди як реагенту для комплексного рафінування чавуну підтвердили, що цей матеріал є ефективним для одночасного видалення сірки, кремнію та фосфору. Лабораторні та промислові дослідження показали, що багатостадійний процес видалення домішок протягом технологічної ланки «позапічна обробка чавуну – киснево-конвертерний цех» є ефективним підходом для комплексного очищення чавуну. Зокрема, на етапі позапічної обробки першочергово досягається ефективне видалення сірки за допомогою реагентів для десульфурації, після чого на етапі конвертера відбувається

додаткове видалення кремнію та фосфору. Використання карбонату натрію (Na_2CO_3) у поєднанні з іншими реагентами, такими як CaO та FeO , показало значний потенціал для комплексного рафінування чавуну. Комбінації цих компонентів продемонстрували високу ефективність у видаленні як сірки, так і фосфору, що дозволяє оптимізувати технологічний процес очищення чавуну.

Для досягнення більшого ступеня очищення від кремнію на етапі позапічної обробки чавуну можуть бути необхідні інші реагенти або технологічні рішення. Аналіз поведінки домішок і хімічних реакцій у процесі обробки свідчить, що введення додаткових відновників, таких як алюміній, може допомогти знизити негативний вплив CO_2 і підвищити ефективність видалення домішок, зокрема сірки до 48 %. Побудовані картографи та діаграми стану продемонстрували, що зміна співвідношень компонентів системи $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3$ дозволяє досягати різного ступеня видалення сірки, кремнію та фосфору, що дає змогу обрати оптимальний склад рафінувальної суміші для кожного конкретного випадку.

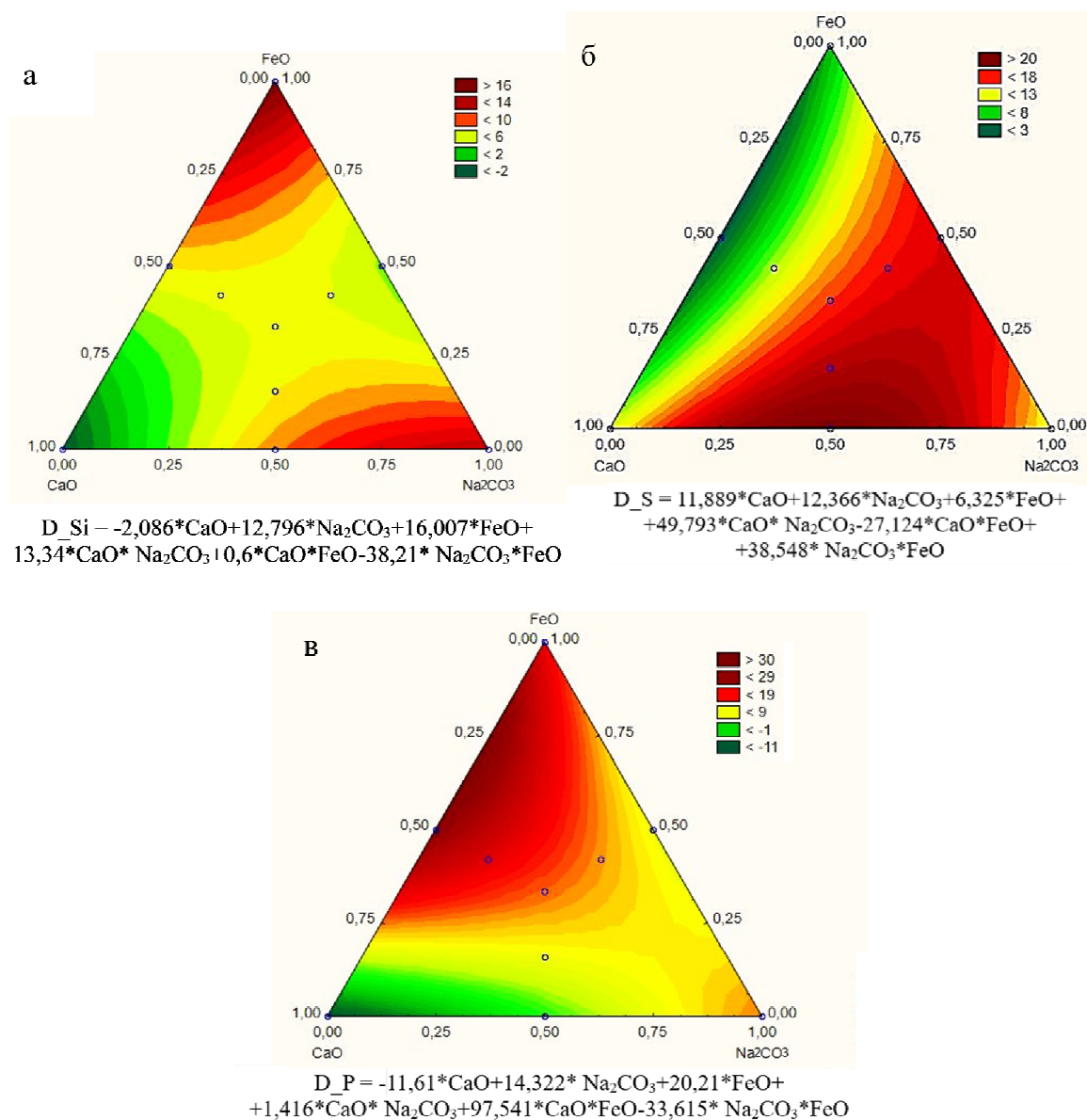


Рис. 1. Діаграми стану впливу компонентів суміші системи $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3$ на ступінь видалення домішок — кремнію (а), сірки (б), фосфору (в) за результатами експериментальних досліджень

Результати досліджень показують, що суміш $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3\text{-Al}$ є придатною для комплексного рафінування чавуну в умовах лабораторних випробувань і може бути ефективно використаною для одночасного видалення кількох шкідливих домішок. Збільшення кількості алюмінію, в дослідних умовах до 20 %, призводить до погіршення показників рафінування від кремнію та фосфору.

Таким чином, ці результати свідчать про необхідність подальших досліджень та оптимізації реагентів і технологічних підходів для підвищення ефективності позапічної обробки чавуну.

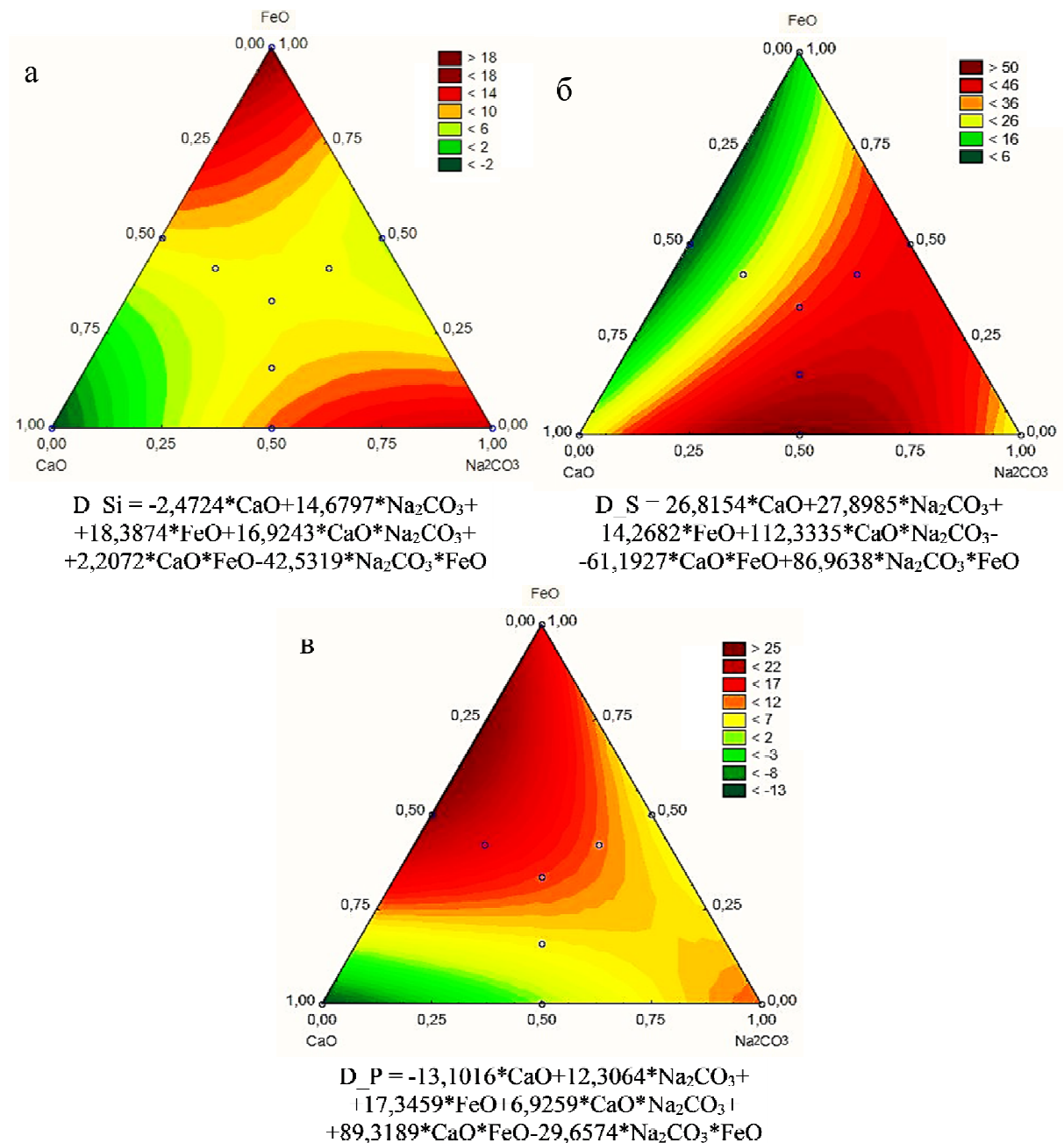


Рис. 2. Діаграми стану впливу компонентів суміші системи $\text{CaO-FeO-Na}_2\text{CO}_3$ на ступінь видалення домішок — кремнію (а), сірки (б), фосфору (в) при додаванні алюмінію у кількості 25 % від загальної маси суміші

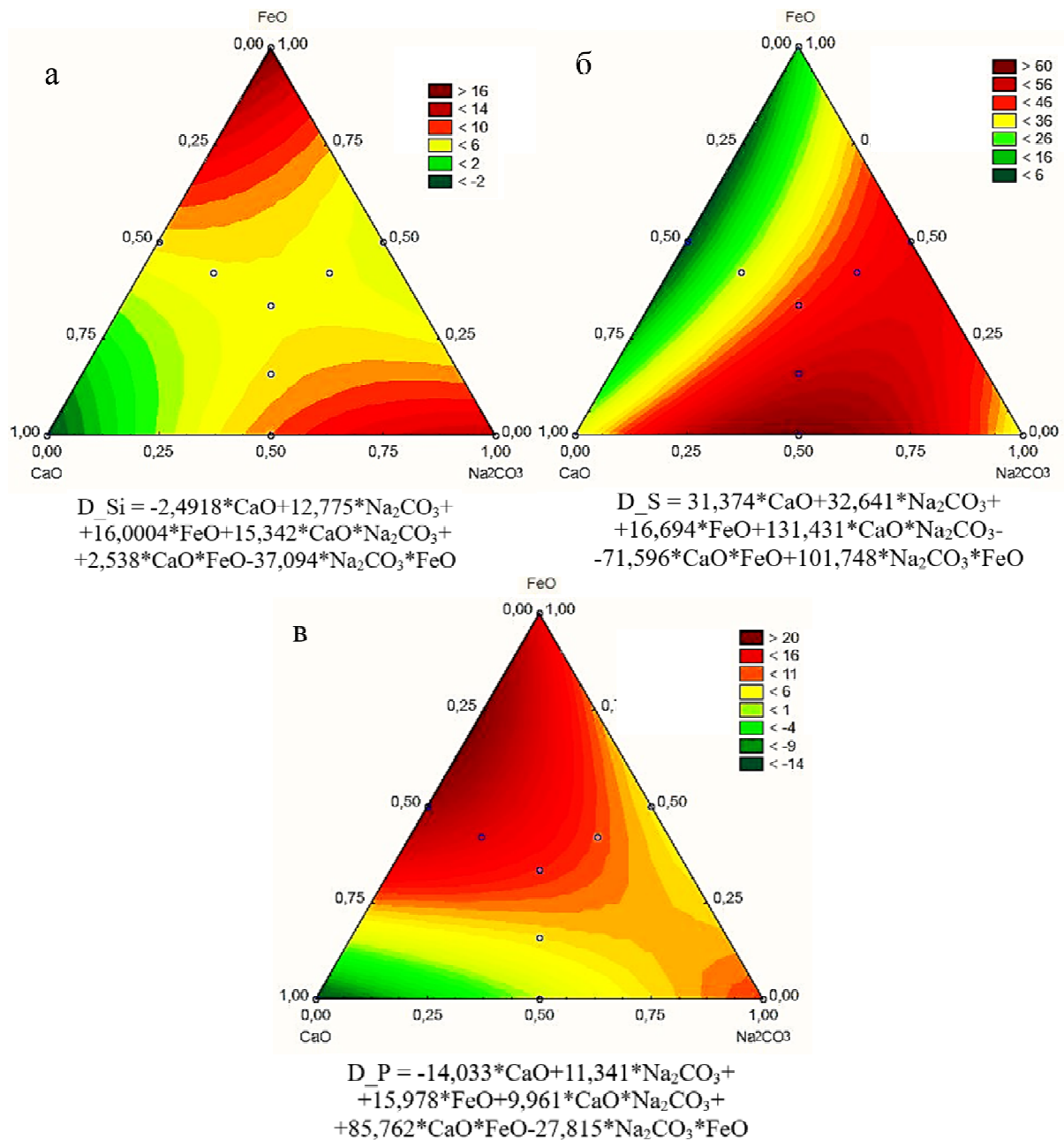


Рис. 3. Діаграми стану впливу компонентів суміші системи CaO-FeO-Na₂CO₃ на ступінь видалення домішок — кремнію (а), сірки (б), фосфору (в) при додаванні алюмінію у кількості 50% від загальної маси суміші

Список використаної літератури

1. Voronova N.A. Desulfurization of Hot Metal by Magnesium (Десульфуріація чавуну магнієм) Publisher. Iron & Steel Society; Publication date. January 1, 1983; ISBN-10. 0912033002 ISBN-13. 978-0912033006.
2. Шевченко А.Г., Большаков В.І., Башмаков О.М. Технологія та обладнання десульфуріації чавуну магнієм у великовантажних ковшах. Київ: Наукова думка, 2017. 205 с.

3. Шевченко А.П., Маначин І.А., Вергун О.С. Позапічна десульфурація чавуну в ковшах. Технологія. Дослідження. Аналіз. Удосконалення. Дніпропетровськ. «Дніпро ВАІ». 2017. 252 с.
4. Руденко О.Л., Вергун О.С., Шевченко А.П. Вивчення процесів випаровування натрійвмісних флюсів і шлаку при комплексній обробці залізвуглецевих розплавів. Збірник праць ІЧМ НАН України "Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". К.: Наукова думка, 1995. С. 92–100.
5. Ogawa Y., Maruoka N. Progress of hot metal treatment technology and future outlook (Прогрес технології гарячої обробки металів і перспективи на майбутнє). Tetsuto hagane Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. 2014. v. 100. № 4. P. 434–444.
6. Смирнов О. М., Зборщик О. М. Позапічна обробка чавуну і сталі. Донецьк: ДонНТУ. 237 с.
7. Смоктьїй В.В., Лапицький В.В., Белокуров Е.С. Комбіновані процеси виплавки сталі в конвертерах. К.: Техніка. 1992. 163 с.
8. Y.Nakamura, N.Tokumitsu, K.Segawa. Refining steel 18% Ch 8% Ni with Ca - CaF₂ (Рафінування сталі 18% Сг 8% Ні за допомогою Ca-CaF₂) Transactions Iron and Steel Institute Japan. 1976. V.16. № 11. p. 623–62.
9. Parma V., Bažan J. Technol výroby oceli (Технологія виробництва сталі) III Mezinar. věd. conf. UŠB Ostravě, Sec. № 15. Ostrava, 1985. P. 66–69.
10. T.Obana. Dephosphorisation liquid Iron by flux Ca-CaO-CaF₂ (Дефосфорація рідкого заліза флюсом Ca-CaO-CaF₂) Tetsu to hagane. 1982. V.68. № 11. p. 968.
11. Охотський В.Б. Моделі металургійних систем. Дніпропетровськ: Системні технології, 2006. 287 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF REAGENTS FOR COMPLEX TREATMENT OF CAST IRON

Abstract

The aim of this work is to summarize the results of using various reagents for the comprehensive removal of impurities from molten cast iron. A comparative analysis of the effectiveness of different reagents for cast iron refining was conducted. The use of soda slag as a reagent was tested at the industrial level in a 140-ton hot metal ladle, and the results of experimental treatments were presented. A technology for comprehensive cast iron refining using the CaO-FeO-Na₂CO₃ reagent system was considered, which is based on the interaction of these components with molten cast iron. Possible chemical transformations occurring during the introduction of these reagents were described, including desulfurization reactions, oxidation, and the removal of harmful impurities. Based on laboratory studies using a "hot" model, an analysis of impurity behavior was conducted, and influence maps of the reagents' components on phosphorus, sulfur, and silicon removal were constructed. Additionally, ternary phase diagrams for the CaO-FeO-Na₂CO₃ system were developed, which helped to determine optimal conditions for comprehensive cast iron refining.

The results of an industrial test of soda ash as a reagent for complex cast iron refining confirmed that this material is effective for the simultaneous removal of sulfur, silicon and phosphorus under certain conditions. Laboratory and industrial studies have shown that a multi-stage impurity removal process during the out-of-furnace cast iron treatment — oxygen converter shop process link is an effective approach for comprehensive cast iron refining. In particular, at the out-of-furnace treatment stage, effective sulfur removal is achieved by using desulphurization reagents, followed by additional silicon and phosphorus removal at the BOF stage. The use of sodium carbonate (Na₂CO₃) in combination with other reagents such as CaO and FeO has shown significant potential for complex cast iron refining. The combinations of these components have demonstrated high efficiency in removing both sulfur and phosphorus, which allows optimizing the technological process of cast iron refining. Other reagents or technological solutions may be required to achieve a higher degree of silicon removal at the out-of-furnace iron treatment stage. The analysis of the behavior of impurities and chemical reactions during the treatment process shows that the introduction of additional reducing

agents, such as aluminum, can help reduce the negative impact of CO₂ and increase the efficiency of impurity removal. The constructed mapping and state diagrams demonstrated that changing the proportions of the components of the CaO-FeO-Na₂CO₃ system allows achieving different degrees of sulfur, silicon, and phosphorus removal, which makes it possible to select the optimal composition of the refining mixture for each specific case. The research results show that the CaO-FeO-Na₂CO₃-Al mixture is suitable for complex cast iron refining under laboratory test conditions and can be effectively used for the simultaneous removal of several harmful impurities. Increasing the amount of aluminum leads to a deterioration in refining performance from silicon and phosphorus.

References

- [1] Voronova, N.A. (1983). *Desulfurization of Hot Metal by Magnesium*. Iron & Steel Society. ISBN-10: 0912033002, ISBN-13: 978-0912033006. [in English].
- [2] Shevchenko, A.P., Bolshakov, V.I., & Bashmakov, O.M. (2017). *Tekhnolohiya ta obladnannya desulfuratsiyi chavunu mahniyem u velykovantazhnykh kovshakh* [Technology and equipment for desulfurization of cast iron with magnesium in heavy-duty ladles]. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian].
- [3] Shevchenko, A.P., Manachin, I.A., & Vergun, O.S. (2017). *Pozapichna desulfuratsiya chavunu v kovshakh. Tekhnolohiya. Doslidzhennya. Analiz. Udoskonalennya* [Out-of-furnace desulfurization of cast iron in ladles. Technology. Research. Analysis. Improvement]. Dnipropetrovsk: Dnipro VAI. [in Russian].
- [4] Rudenko, O.L., Vergun, O.S., & Shevchenko, A.P. (1995). Vychennya protsesiv vyparovuvannya natriyvmisnykh flyusiv i shlaku pry kompleksniy obrobtisi zalizovuhletsevykh rozplaviv [Study of evaporation processes of sodium-containing fluxes and slag during complex processing of iron-carbon melts]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, Institute of Chemical Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, 92–100. [in Russian].
- [5] Ogawa, Y., & Maruoka, N. (2014). Progress of hot metal treatment technology and future outlook. *Tetsu to Hagane: Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 100(4), 434–444. [in English].
- [6] Smirnov, O. M., & Zborshchuk, O. M. (n.d.). *Pozapichna obrobka chavunu i stali* [Out-of-furnace treatment of cast iron and steel]. Donetsk: DonNTU. [in Russian].
- [7] Smoktiy, V.V., Lapitsky, V.V., & Belokurov, E.S. (1992). *Kombinovani protsesy vyplavky stali v konverterakh* [Combined processes of steelmaking in converters]. Kyiv: Technika. [in Russian].
- [8] Nakamura, Y., Tokumitsu, N., & Segawa, K. (1976). Refining steel 18% Cr 8% Ni with Ca – CaF₂. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 16 (11), 623–628. [in English].
- [9] Ragma, V., & Bážan, J. (1985). *Technol výroby oceli* [Technology of Steel Production]. III Mezinar. věd. conf. UŠB Ostravě, Sec. No. 15, Ostrava, 66–69. [in Czech].
- [10] Obana, T. (1982). Dephosphorisation of liquid iron by Ca-CaO-CaF₂ flux. *Tetsu to Hagane*, 68(11), 968. [in English].
- [11] Okhotskiy, V.B. (2006). *Modely metallurhicheskoykh sistem* [Models of Metallurgical Systems]. Dnepropetrovsk: System Technologies. [in Russian].

Надійшла до редколегії 13.11.2024