

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-588-601>

УДК 669.162.231/.238

Д. С. Зотов¹, к.т.н, ORCID 0009-0007-2996-0709

К. Г. Нізяєв², д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-9260-0964

О. В. Узлов³, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0003-1329-5576

О. В. Пучиков³, с.н.с., ORCID 0000-0003-4119-6399

О. А. Шпак³, м.н.с.

¹ ПАТ "УКРНАФТА"

² Український державний університет науки і технологій

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ЗНИЖЕННЯ ВМІСТУ ТА РОЗМІРІВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В ШТРИПСОВОМУ ПРОКАТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ МАРКИ СТАЛІ

Анотація. Зменшення кількості неметалевих включень в готовому прокаті при виплавці та обробці сталі високої якості є нагальною проблемою для всіх світових металургійних підприємств. В роботі наведені результати по покращенню якості низьковуглецевої сталі за чистотою по неметалевим включенням в умовах серійного виробництва на одному з металургійних комбінатів України. Введення великих порцій алюмінію в переокислений метал при випусканні сталі в ківш, в різних зонах розплаву призводить до утворення різних комбінацій оксидів. Більші частки коагулюють та асимілюють в шлак, а менші частки герценіту, муліту, магнезійних шпінелей залишаються в розплаві. Повне видалення названих включень при позапічній обробці сталі як правило досить складне. Для зменшення кількості та розмірів неметалевих включень алюмінатів та силікатів в прокаті, необхідно забезпечити пригнічення утворення цих комплексних неметалевих з'єднань на етапі розкислення сталі при зливанні з конвертера в ківш. Зробити це можна шляхом створення термодинамічних умов для повного переходу з'єднань в шлак, або шляхом заміни алюмінатів на альтернативні розкислювачі, які не забруднять сталь. Використання для розкислення рідкої сталі кальцію та вуглецю при додаванні в розплав дозволяє зменшити кількість залишкових неметалевих включень на основі алюмінію в прокаті за рахунок підвищення їх розчинності в рідкій сталі, а також винесення надлишкового кисню в газоподібному стані у вигляді сполук CO та CO₂. Проаналізований вплив розкислення карбідом кальцію при попередньому розкисленні під час зливання напівпродукту з кисневого конвертера на ступінь забрудненості неметалевими включеннями в плоскому прокаті. Визначення забрудненості готового прокату неметалевими включеннями виконувалось згідно з вимогами

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



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

ДСТУ 8966:2019. Виконане коригування технології розкислення сталі на фінальній стадії виплавлення в конвертерній дільниці. Показано, що часткова заміна алюмінію на карбід кальцію при розкисненні сталі на фінальній стадії виплавки дозволяє знизити забрудненість штрипсового низьковуглецевого прокату неметалевими включеннями.

Ключові слова: карбід кальцію, штрипс, неметалеві включення, низьковуглецева сталь.

Посилання для цитування: Зотов Д. С., Нізяєв К. Г., Узлов О. В., Пучіков О. В. Зниження вмісту та розмірів неметалевих включень в штрипсовому прокаті низьковуглецевої марки сталі. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 588-601. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-588-601>.

Вступ. Умовою отримання сталевого прокату високої якості є забезпечення чистоти сталі по неметалевим включенням, газам та шкідливим домішкам. Морфологія та характер розподілення включень в металевій матриці закладається здебільшого на фінальній стадії виплавки сталі в конвертері під час розкислення та визначається видом розкислювачів, які використовуються та послідовністю їх вводу в рідкий метал [1].

Згідно з вимогами ДСТУ 8966:2019 оцінювання чистоти штрипсової сталі по неметалевим включенням (НВ) відбувається згідно зі шкалою Ш6. Неметалеві включення підпадають під узагальнену класифікацію у п. 4.1.2 ДСТУ 8966:2019 як оксиди точкові (ОТ), силікати крихкі (СК), силікати недеформовані (СН). Окрема класифікація в ДСТУ для комплексних поєднань оксидів кальцію з алюмінатами відсутня. В поточній атестації зразків плавок при виробництві метод точного спектрального аналізу EDX електронної скануючої мікроскопії не застосовується, тому комплексні сполуки оксидів кальцію з алюмінатами класифікувались як оксиди точкові та силікати крихкі та силікати недеформовані (ОТ, СК, СН).

У зв'язку з підвищенням якісних вимог замовника до штрипсового прокату по неметалевим включенням проаналізований стан поточного виробництва конвертерного цеху на одному металургійних комбінатів України. Співзіставлення з вимогами ДСТУ 8966:2019 та замовника наведені в табл. 1.

Характерні неметалеві включення в низьковуглецевому штрипсі поточного виробництва наведені на рис. 1-3. Проби класифікувались згідно з джерелом [2].

Металографічний аналіз проб металу з МБЛЗ та готового прокату показав, що основним видом неметалевих включень є оксиди та силікати, квазірівномірно розподілені по висоті ківша.

Таблиця 1 - Співзставлення вимог до бальності по неметалевим включенням

Найменування	Бал згідно зі шкалою ШБ	
	Середній	Максимальний
ДСТУ 8966:2019	2,5	4,0
Вимоги замовника	2,0	3,5
Поточне виробництво	3,0	5,0

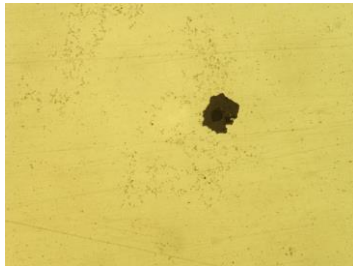


а, x50

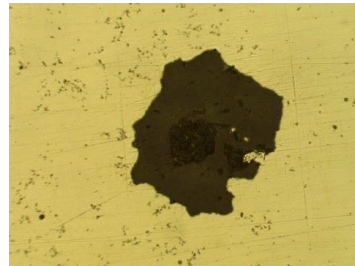


б, x50

Рисунок 1 - Неметалеві включення типу Al_2O_3 (корунд) – маленькі дуже тверді кристалики, при поліруванні викришуються та залишають «хвости»

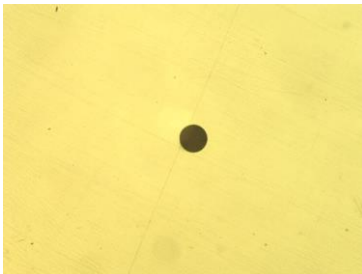


а, x100



б, x400

Рисунок 2 - Неметалеві включення типу $FeO_x \cdot Al_2O_3$ (герценіт або залізна шпінель). Утворюють конгломерати неправильної форми, важко видаляються з розливу через високу адгезію до рідкого металу



x100

Рисунок 3 - Неметалеві включення типу $CaO \cdot SiO_2$ - силікат кальцій, глобулярний, колір темно-сірий, поверхня на вигляд шорстка

Для встановлення природи неметалевих включень на лабораторному устаткуванні Інституту технології сталі та чавуну Фрайберзької гірничої академії, Німеччина, був виконаний електронномікроскопічний аналіз на растровому скануючому мікроскопі Karl Zeiss Supra 40 із спектральним електронно-дисперсійним аналізом включень (EDX). Результати аналізу деяких характерних часток неметалевих включень наведені на рис. 4 -6.

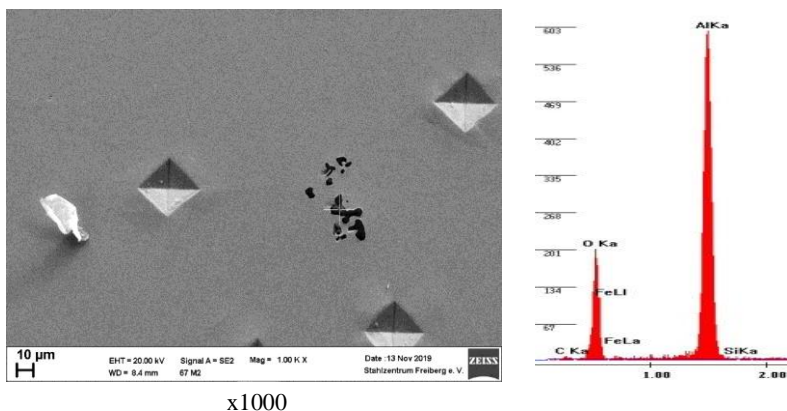


Рисунок 4 - Скупчення оксидів. Згідно з результатами спектрального аналізу на піковій діаграмі в правій частині рисунку, це оксиди алюмінію (масова частка Al 53%, O – 31%, Fe - 12%)

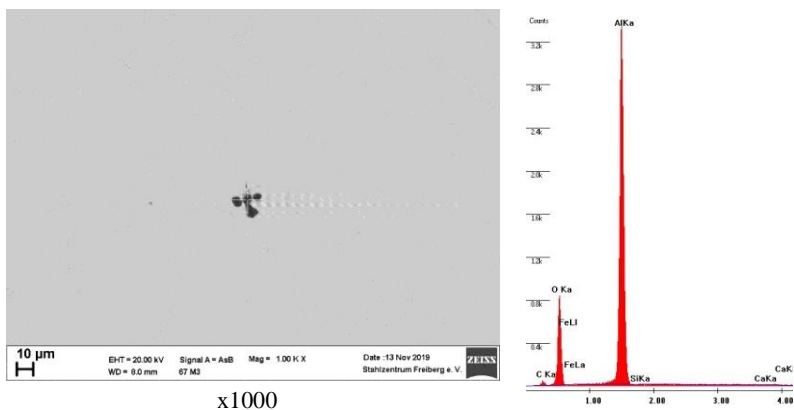
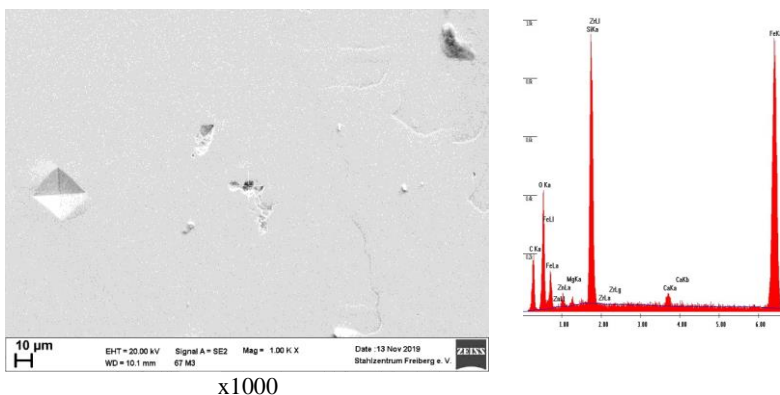


Рисунок 5 - Скупчення оксидів. Згідно з результатами спектрального аналізу на піковій діаграмі в правій частині рисунку, це оксиди алюмінію (масова частка Al - 58%, O - 32%, Fe - 2%, Ca - 0,5%)



x1000

Рисунок 6 - Скупчення оксидів. Згідно з результатами спектрального аналізу на піковій діаграмі в правій частині рисунку, це оксиди кремнію в матриці заліза (масова частка Si 16%, O - 10%, Fe - 56%, C - 14%, Ca - 2%)

Енергодисперсійний спектральний EDX аналіз хімічного складу включень в експериментальних плавках показав, що це здебільшого оксиди алюмінію та кремнію, зрідка комплексні оксиди з невеликою кількістю кальцію або магнію.

Отримані данні підтверджують результати, які наведені в роботі [3].

Для зменшення кількості та розмірів неметалевих включень алюмініатів та силікатів в прокаті, необхідно забезпечити пригнічення утворення цих комплексних неметалевих з'єднань на етапі розкислення сталі при зливанні з конвертера в ківш. Зробити це можна шляхом створення термодинамічних умов для повного переходу з'єднань в шлак, або шляхом заміни алюмініатів на альтетрнативні розкислювачі, які не забруднять сталь.

Одним із таких альтернативних розкислювачів з точки зору зменшення забрудненості прокату неметалевими з'єднаннями алюмінію може бути карбід кальцію. В виробничій практиці одного з металургійних підприємств CaC₂ використовувався значний час як розкислювач в конвертерному виробництві середньовуглецевих марок сталей і показав задовільну економічну ефективність застосування як альтернатива алюмінію вторинному АВ-87 при попередньому розкисленні. Витрати на розкислення за рахунок зменшення частки алюмінію зменшились на 20% [4].

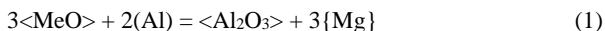
Інформації про вплив розкислення сталі карбідом кальцію на фінальній стадії виплавки на забезпечення чистоти по неметалевим включенням в літературних джерелах немає. Тому дослідження технології розкислення низьковуглецевих сталей на фінальній стадії

вилавки за допомогою карбїду кальцію з метою зменшення забрудненості неметалевими включеннями штрипсового низьковуглецевого прокату є вельми актуальним.

Мета роботи. Розробка технічних рішень та технологічних прийомів, які спрямовані на пригнічення утворення комплексних неметалевих з'єднань алюмінію, небажаних в штрипсовій сталі. Оцінка ефективності заміни алюмінію на карбїд кальцію при розкисленні низьковуглецевої сталі на фінальній стадії вилавки на чистоту готового прокату по неметалевим включенням.

Результати дослідження. Введення великих порцій алюмінію в переокиснений метал при випусканні сталі в ківш, в різних зонах розплаву призводить до утворення різних комбінацій оксидів. Це в свою чергу призводить до утворення не тільки включень корунда, але й великої кількості включень герценїту $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Також великі порції алюмінію активно взаємодіють з футеруванням ковшу з утворенням магнезїальних шпїнелей $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Утворення магнезїальної шпїнелі, коли MgO з вогнетриву та з шлаку спочатку розкислюється алюмінієм, зумовлений тим, що MgO є менш стабільним, ніж CaO . Внаслідок цього формуються комплексні частки $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Узагальнено хїмічні реакції відновлення оксидів кальцію та магнію алюмінієм можна навести так:

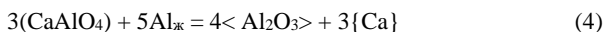


Енергію Гїббса для цих реакцій можна визначити з рівнянь [5]:

$$\Delta G_{\text{CaO} - \text{Al}} = 687780 - 15,675 \cdot T \cdot \lg(T) - 199,16 \cdot T, \text{ Дж/моль} \quad (T = 1760 - 2500 \text{ К}); \quad (2)$$

$$\Delta G_{\text{MgO} - \text{Al}} = 581190 + 76,75 \cdot T \cdot \lg(T) - 563,8 \cdot T, \text{ Дж/моль} \quad (T = 1700 - 2500 \text{ К}). \quad (3)$$

Температура початку цих реакцій складає приблизно 2720 К та 1850 К відповідно. Проте утворюваний в результаті протікання реакції (1.1) оксид алюмінію повинен активно вступати у взаємодію з відповідним оксидом лужноземельного металу, перешкоджаючи таким чином відновленню останнього. При цьому, наприклад, температура початку реакції (4) складає більше, ніж 3800 К.



При розкисленні сталі кальцієм включення шпїнелі $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ стають нестабільними і модифікуються в комплексні частки $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Точка плавлення включень зменшується і при температурі рїдкої сталі вони стають рїдкими та отримують глобулярну форму.

Проте, 100% перехїд комплексних включень оксидів алюмінію,

кальцію, магнію в рідкий стан з повною коалесценцією на серійних сталеплавильних виробництвах неможливий. Одночасне введення в переокислений метал при випусканні алюмінію та кремнію веде до утворення не тільки надлишкової кількості герценіту, але й великій кількості включень муліту $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ [3].

Температури плавлення герценіта, муліта та магнезійної шпінелі вищі за температуру плавлення сталі і складають для герценіта $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $T_{\text{пл}} = 1780^\circ\text{C}$, для муліта $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ $T_{\text{пл}} = 1850^\circ\text{C}$, для магнезійної шпінелі $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ $T_{\text{пл}} = 2105^\circ\text{C}$ [6].

Більші частки коагулюють та асимілюють в шлак, а менші частки герценіту, муліту, магнезійних шпінелей залишаються в розплаві. Повне видалення названих включень при позапічній обробці сталі як правило досить складне. В подальшому при безперервному розливанні сталі алюміній завжди виділяється на поверхні стаканів-дозаторів металу при переливанні з проміжного ківша в кристалізатор, а при їх надмірній кількості це призводить навіть до повного заростання внутрішнього каналу стаканів (clogging). Через це іде погіршення умов розливання сталі в кристалізатор. З'являються неконтрольовані коливання швидкості розливання сталі, що призводять до захоплення під поверхню сталеві заготовки шлакоутворюючої суміші, а також потрапляння в об'єм заготовки часток алюмініатів.

Зниження температури плавлення алюмініатів та силікатів в сталі можливе за рахунок додавання кальцію. При цьому можливе утворення наступних з'єднань (в дужках – температура плавлення відповідного з'єднання): CaAl_2O_4 (1600°C), $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (1535°C), $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (1455°C), $\text{Ca}_5\text{Al}_6\text{O}_{14}$ (1455°C), $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ (1382°C), $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (1553°C), $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ (1590°C). Це повинно сприяти їх переходу в рідкий стан в розплаві та наступній їх коалесценції і коагуляції в покривний шлак.

Чистий Са економічно недоцільно вводити в розплав через його малу розчинність в рідкому залізі. При введенні кальцію у вигляді сплаву, він має задовільну розкислюючу спроможність за рахунок покращення розчинності. Слід також врахувати, що кальцій підвищує розкислюючу спроможність кремнія та алюмінія [7].

Кальцій є істотно дорожчим за алюміній, тому FeCa або SiCa дріт використовується в загальній практиці на кінцевому етапі позапічної обробки або після вакуумування сталі для модифікування залишкових неметалевих включень.

Розкислення вуглецем є ще одним можливим шляхом забезпечення чистоти сталі по неметалевим включенням через те, що вуглець на відміну від всіх інших перелічених розкислювачів утворює з киснем газообразні CO та CO_2 . Ці сполуки майже безперешкодно

випаровуються з розплаву і не взаємодіють з твердими неметалевими включеннями. [7]. Але віддавання чистого вуглілля типу АО в ківш при зливанні сталі з конвертера як розкислювача нетехнологічно.

Використання для розкислення рідкої сталі кальцію та вуглецю при додаванні в розплав в вигляді сполуки карбіду кальцію дозволяє прибрати недоліки роздільного використання цих розкислювачів.

Карбід кальцію обмежено застосовується в металургії, в основному для проведення операції позадоменної десульфурації чавуну або десульфурації сталі при позапичній обробці [8, 9]. Технологія заміни алюмінію карбідом кальцію під час зливання плавки з конвертера, не знайшла широкого застосування на металургійних підприємствах через технічну складність зберігання та транспортування (CaC_2 має повинен знаходитись в герметичному контейнері та подаватись в ківш зі спеціальної установки з вакуумним клапаном через окремий тракт). Але за наявності такої установки, використання карбіду кальцію на заміну частки алюмінію при розкисненні сталі після конвертування дозволяє суттєво зменшити витрату алюмінію та отримати економію. В роботі [4] експериментальним шляхом встановлено, що використання карбіду кальцію на попереднє розкислення сталі дозволяє зменшити загальну витрату алюмінію на 0,41 кг/т. Питання забезпечення чистоти сталі по неметалевим включенням при використанні карбіду кальцію в роботі [4] не досліджувалось.

З метою оцінки можливості використання карбіду кальцію як розкислювача замість алюмінію та його впливу на ступень видалення зі сталі ендогенних неметалевих включень, відпрацювали комплекс дій на виробництві сталі 09Г2С для нафтопроводів з підвищеними вимогами до чистоти по сірці та фосфору. Хімічний склад марки сталі наведений в табл. 2.

Таблиця 2 - Хімічний склад низьковуглецевого прокату 09Г2С для запірної арматури нафтопроводів з товщиною плоского прокату до 65 мм

Масова частка елементів, %														Ca
C	Mn	Si	Al	Nb	Ni	S	P	Ti	Cr	Cu	N	V	Mo	
не більше														
0,08-0,12	1,60-1,70	0,50-0,70	0,020-0,050	0,020-0,040	0,20-0,30	0,003	0,012	0,005	0,15	0,15	0,008	0,080	0,08	0,020

Були виконані наступні технологічні прийоми на етапі розкислення сталі при зливанні з конвертера.

1. Виконали додаткове узагальнення температури та хімічного складу в конвертері перед зливанням напівпродукту.
2. Запровадили розкислювання карбідом кальцію на заміну

алюмінію. Витрати CaC_2 розраховували виходячи з необхідності отримання заданого вмісту вуглецю в готовій сталі. Введення CaC_2 здійснювали після наповнення сталерозливного ківша металом на $\frac{1}{4}$ його висоти.

3. Введення марганця металевого (з вмістом вуглецю не більше 0,2%) та феросиліцію FeSi 65 здійснювали після наповнення ківшу металом на $\frac{1}{3}$ його висоти з паузою 30 секунд.

4. Після віддавання Mn95 та FeSi 65 з паузою 30 секунд здійснили введення через тракт гранульованого алюмінію AB87.

Основні параметри плавок на зливі з конвертера та на вході до УКП наведені в таблиці 3.

При аналізі таблиці 3 варто відзначити практичну відсутність зростання вмісту вуглецю в сталі (+0,006%). Це стало стало можливим в наслідок коригування технологічних режимів введення розкислювачів із забезпеченням умов активного перемішування металу в ківші за рахунок енергії падаючого струменя.

Таблиця 3 - Параметри плавок на зливі з конвертера (по даним приладу Heraeus MultiLAB) та на вході до УКП.

№ плавки	Параметри на повалці до розкислення			Параметри на вході до УКП після розкислення			
	Т метала, °C	C, %	Окисність, ppm	Т метала, °C	Вміст елементів, %		
					C	Al	Ca
9150	1643	0,063	648	1569	0,07	0,0494	0,0006
9151	1615	0,084	407	1575	0,09	0,0181	0,0005

На завершальному етапі обробки на УКП проводили нагрів плавок до температури 1620-1640 °C і потім вводили катанку алюмінієву та силікокальцієвий дріт для модифікування ендегенних неметалевих включень.

Перед передаванням плавок на установку вакуумації для видалення асимільованих в шлак ендегенних включень проводилось зливання шлаку з ківша. Обидві плавки проходили вакуумну дегазацию (VD) впродовж 10 хвилин. Після вакуумування вводили катанку алюмінієву для забезпечення хімічного складу сталі та силікокальцієвий дріт для модифікування третинних ендегенних неметалевих включень.

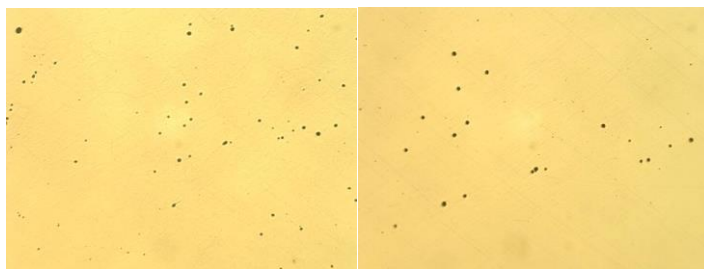
Параметри плавок до та після вакуумної дегазации VD наведені в таблиці 4.

На всіх етапах технологічного процесу проводили відбір дослідницьких проб для металографічного аналізу морфології неметалевих включень. Проби класифікувались згідно з джерелом [2].

Деякі характерні фото металографічних досліджень неметалевих включень (НВ) наведені на рис. 7-9.

Таблиця 4 - Параметри плавки до та після вакуумної дегазації

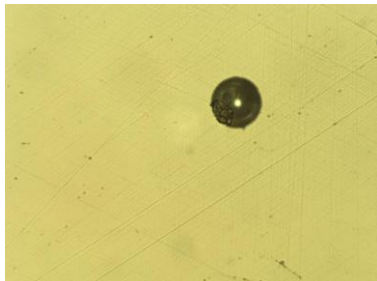
№ плавки	Параметри перед VD				Параметри після VD та введення Al+ SiCa дроту				
	Т метала, °C	Вміст елементів, %			Т метала, °C	Вміст елементів, %			Вміст H ₂ , ppm
		C	Al	Ca		C	Al	Ca	
9150	1633	0,11	0,0375	0,0068	1560	0,11	0,0324	0,0022	2,0
9151	1626	0,12	0,0181	0,0060	1558	0,11	0,0350	0,0042	1,8



а, x50

б, x100

Рисунок 7 - Локальні скупчення мілких глобулярних НВ типу $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ – муліт, які викришуються при поліруванні



x400

Рисунок 8 - SiO_2 або $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$, або Ca_2SiO_4 , або Fe_2SiO_4 (з блискучою крапкою та круговими відсвітами).



x1000

Рисунок 9 - $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - силікат кальція, глобулярний, колір темно-сірий, поверхня на вигляд шорстка.

Оцінку ступеня забрудненості металу по неметалевим включенням в готовому прокаті виконували згідно з методикою ДСТУ 8966:2019 за шкалою ШБ.

Дані по забрудненості експериментальних плавок наведені в табл. 5 та 6.

Таблиця 5 - Забрудненість прокату плавки № 9150 неметалевими включеннями

№	Номер сляба	Товщина проката, мм	СК силікати крихкі		СН силікати недеформ.	
			Середній	макс	Середній	макс
1	5-3	80	0,2	0,5 (2 шт)	1,9	3,0 (2 шт)
2	4-1	70	0,60	1,0 (2 шт)	2,3	4,0 (1 шт)
3	2-1	11	1,1	1,5 (2 шт)	2,1	2,5 (2 шт)
4	3-6	10	1,5	2,0 (2 шт)	2,3	3,0 (1 шт)

Таблиця 6 - Забрудненість прокату плавки № 9151 неметалевими включеннями.

№	Номер сляба	Товщина прокату, мм	СК силікати крихкі		СН силікати недеформ.	
			Середній	Макс	Середній	Макс
1	6-1	70	1,3	2,0 (2 шт)	4,0	5,0 (3 шт)
2	4-5	50	0,8	1,0 (3 шт)	2,3	3,0 (1 шт)
3	4-6	30	1,6	2,5 (2 шт)	2,4	4,0 (1 шт)
4	4-1	10	1,2	3,0 (1 шт)	2,6	4,0 (1 шт)
5	2-1	8	1,5	2,5 (1шт)	2,6	3,0 (1 шт)

На обох плавках середній та максимальний бал силікатів крихких та середній бал силікатів недеформованих знаходилися у відповідності до вимог ДСТУ 8966. По максимальному балу силікату недеформованого були відзначені поодинокі випадки перевищення на прокаті з товщиною більше 50 мм (з низьким ступенем деформації).

Додатково треба відзначити, що вся поверхня шліфів експериментальних плавок детально оглядалася під мікроскопом в пошуках неметалевих включень, що перевищують вимоги покупців. Згідно з вимогами ДСТУ 8966:2019 за методом ШБ, такий ретельний пошук відхилень не виконується. Знаходиться найбільш забруднене місце на шліфу і тільки на ньому проводиться оцінка.

При аналізі результатів в таблицях 5 та 6 звертає увагу залежність зменшення загального рівня забрудненості прокату силікатами недеформованими від зменшення товщини металу та збільшення обтискань при прокатці.

Таким чином, вдосконалення алгоритму розкислювання штрипсової низьковуглецевої сталі на фінальній стадії виплавки з використанням карбїду кальцію дозволило отримати відповідність

вимогам замовника по питомій чистоті за неметалевиими включеннями на експериментальних плавках.

Висновки

Проведена оцінка зміни технології розкислення низьковуглецевої сталі на фінальній стадії виплавляння металу в конвертері на морфологію та характер утворення неметалевих включень в готовому прокаті.

Показано, що використання карбіду кальцію для розкислення сталі взамін частки алюмінію для розкислення низьковуглецевої сталі під час фінальної стадії виплавки в конвертері дозволяє отримати задовільні результати з чистоти сталі по неметалевим включенням.

Також показано, що впорядкована технологія додавання марганцевих, кремнієвих феросплавів та алюмінію для запобігання утворення комплексних ендогенних неметалевих включень дає позитивний ефект.

Перелік посилань

1. Голубцов В. А., Рошин В. Е., Зинченко С. Д., Воронин А. А. Происхождение неметаллических включений и пути снижения загрязненности ими металла. *Металлург.* 2005. № 4. С. 73– 77

2. Червяков А. Н., Киселева С. А., Рьльникова А. Г. *Металлографическое определение включений в стали.* М.: *Металлургия*, 1962.

3. Милейковский А. Б., Малахов Н. В., Казаков А. А., Ковалев П. В., Рябошук С. В. *Неметаллические включения в высокопрочных трубных сталях.* *Черные металлы.* 2009. С. 5–11

4. Kostyrya I., Orlichenko M., Frolov S., Zotov D. Experience in Application of Calcium Carbide in BOF Converter Shop of PJSC "Azovstal iron- and Steelworks". *Metallurgisches Kolloquium zu Ehren von Prof. Dieter Janke.* 67. *Berg- und Huetmaennischer Tag* 2016. *Freiberger Forschungshefte, B366 Werkstofftechnologie*, p. 120-123

5. Кубашевский О., Оллокк К. Б. *Металлургическая термохимия.* М.: *Металлургия*, 1982. 392с.

6. Бережной А. С. *Багатокомпонентні системи окислів. К. : Наукова думка*, 1970.

7. Кньюппель Г. *Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 1 Термодинамические и кинетические закономерности.* М. *Металлургия*, 1973.

8. Ghosh A., Chatterjee A. *Ironmaking and Steelmaking. Theory and Practice.* PHI Learning, 2008. 296 p.

9. Грудницький О. М. *Опыт использования карбида кальция для раскисления стали взамен алюминия в условиях ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».* *Литье и металлургия.* 2020. №2. С. 53-58

References

1. Golubcov, V. A., Roshhin, V. E., Zinchenko, S. D., & Voronin, A. A. (2005). *Proishozhdenie nemetallicheskih vključenij i puti snizhenija zagrjzennosti imi*

metalla. *Metallurg*, (4), 73–77

2. Chervjakov, A. N., Kiseleva, S. A., & Rylnikova, A. G. (1962). *Металлографическое определение вclusions в стали*. *Metallurgija*

3. Milejkovskij, A. B., Malahov, N. V., Kazakov, A. A., Kovalev, P.V. , & Rjaboshuk, S. V. (2009). Nemetallicheskie vkljuchenija v vysokoprochnyh trubnyh staljah. *Chernye metally*, 5-11

4. Kostyrya, I., Orlichenko, M., Frolov, S., & Zotov, D. (2016). Experience in Application of Calcium Carbide in BOF Converter Shop of PJSC “Azovstal iron- and Steelworks” *Metallurgisches Kolloquium zu Ehren von Prof. Dieter Janke. 67. Berg- und Huetmaennischer Tag 2016*. Freiburger Forschungshefte, B366 Werkstofftechnologie. P. 120-123

5. Kubashevskij, O., & Olkock, K. B. (1982). *Metallurgicheskaja termohimija*. *Metallurgija*

6. Berezhnoj, A. S. (1970). *Bagatokomponentni sistemi oksiliv*. *Naukova dumka*

7. Knjuppel, G.(1973). *Raskislenie i vakuumnaja obrabotka stali. Chast' 1 Termodinamicheskie i kineticheskie zakonomernosti*. *Metallurgija*

8. Ghosh, A., & Chatterjee, A. (2008). *Ironmaking and Steelmaking. Theory and Practice*. PHI Learning

9. Grudnickij, O. M. (2020). Opyt ispolzovanija karbida kal'cija dlja raskislenija stali vzamen aljuminija v uslovijah OAO "BMZ – upravljajushhaja kompanija holdinga "BMK". *Lit'e i metallurgija*, (2), 53-58

D. S. Zotov¹, Ph. D. (Tech.), ORCID 0009-0007-2996-0709

K. H. Niziaiev², D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-9260-0964

O. V. Uzlov³, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0003-1329-5576

O. V. Puchykov³, Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4119-6399

O. A. Shpak³, Junior Researcher

¹ PJSC “UKRNAFTA”

² Ukrainian State University of Science and Technologies

³ Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

REDUCTION OF THE CONTENT AND SIZE OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STRIP ROLLED LOW CARBON STEEL

Abstract. Reducing the number of non-metallic inclusions in finished rolled products during smelting and processing of high-quality steel is an urgent problem for all global metallurgical enterprises. Results of low carbon steel quality improvement by non-metallic inclusions cleanliness parameters at Ukrainian steel plant are shown. Deoxidation of semi-product with large quantity of aluminium during tapping leads to formation of vast variety of oxide inclusions. Bigger ones coagulate and assimilate into slag. Smaller inclusions of herzenite, mulit and magnesium spinel usually stay in liquid steel. Complete elimination of smaller non-metallic inclusions during ladle furnace treatment is rather difficult.

In order to decrease size and quantity of alumina and silicate non-metallic inclusions one should provide oppression of these complex inclusions formation during steel

tapping from converter to the ladle. This could be achieved by creating thermodynamical conditions for complete transfer of non-metallic inclusions into slag. Another way is to change aluminium for alternative deoxidisers which do not pollute steel. Steel deoxidation with help of calcium or carbon may allow to decrease quantity of alumina non-metallic inclusions drastically because of positive effect on their solubility in liquid steel as well as redundant oxygen removal as a gas in CO and CO₂ compounds. Effect of calcium carbide preliminary deoxidation during pouring of the semi-finished product from the oxygen converter on the content of non-metallic inclusions in flat rolled product has been analyzed. Non-metallic inclusions severity level number has been made according to DSTU 8966:2019. Technology of steel deoxidation during converter tapping has been improved. It has been shown that the partial replacement of aluminium with calcium carbide during deoxidation of steel at the final stage of smelting allows to reduce content of non-metallic inclusions in low-carbon flat rolled strip product.

Key words: calcium carbide, strip rolled product, non-metallic inclusions, low-carbon steel.

For citation: Zotov, D. S., Niziaiev, K. H., Uzlov, O. V., Puchykov, O. V., & Shpak, O. A. (2024). Reduction of the content and size of non-metallic inclusions in strip rolled low carbon steel. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 588-601. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-588-601>

Стаття надійшла до редакції збірника 23.08.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)