

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКА ДЕРЖАВНА ІНЖЕНЕРНА АКАДЕМІЯ

Ляшко Єгор Олегович

УДК 669.18.04 : 669.85/86

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ
ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ СИЛІКОКАЛЬЦІЄМ І РЗМ**

Спеціальність 8.09040101 “Металургія чорних металів”

Автореферат
кваліфікаційної роботи магістра

Запоріжжя - 2016

Робота є рукопис.

Робота виконана на кафедрі металургії чорних металів Запорізької державної інженерної академії Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

Кандидат технічних наук, доцент Кириченко О.Г.

Рецензент:

Начальник дільниці ЦТВС ПАТ «Запоріжсталь»
Штапура Є.В.

Захист кваліфікаційної магістерської роботи відбудеться
“12” січня 2016 р. в 9⁰⁰ в аудиторії 225 на засіданні Державної екзаменаційної комісії в Запорізькій державній інженерній академії за адресою: 69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. У світовій практиці сталеплавильного виробництва сталей відповідального призначення з метою посилення ефективності позапічної обробки зокрема шляхом рафінування й модифікування металу й неметалевих включень застосовують хімічно активні реагенти - силікокальцій і РЗМ. На сьогоднішній день введення їх здійснюють у сталерозливний ківш на установці доведення металу - УДМ; або в струмені інертного газу - носія через занурену фурму; або порошковим дротом по напрямній трубі трайбапаратом. Слід зазначити, що введення хімічно активних реагентів порошковими дротами по багатьом характеристикам значно ефективніше, чим у струмені газу - носія.

Як показує практика й наукові дослідження елементи, що вводяться в сталерозливний ківш, такі як силікокальцій і РЗМ, через високу хімічну активність, сильний вигар і тривале перебування в обробленій сталі в рідкому стані до кристалізації не завжди дають очікуваний ефект по модифікуванню структури й неметалевих включень через недостатній їхній вміст у сталі, що кристалізується. Тому представляє великий практичний і науковий інтерес розробити й випробувати технологію мікролегування сталі силікокальцієм і РЗМ за допомогою порошкового дроту на більш пізньому етапі безперервного розливання сталі, наприклад, у промковші МБЛЗ.

У конвертерних цехах для рафінування сталі використовують порошкоподібний силікокальцій марки СК25 або СК30 з масовою часткою кальцію не менше 25% з технологічною добавкою плавикового шпату марок Ф75 або Ф85 з масовою часткою до 5%. Суміш силікокальцію із плавиковим шпатом гранулометричного складу не більше 1,0 мм (у т.ч. частка фракції менше 0,4 мм - не менш 85%) уводять у метал з витратою близько 2,0 кг/т сталі в струмені аргону через футеровану фурму. Відомо, що продувка сталі дрібнодисперсними порошками хімічно активних елементів дає гарний ефект, однак тонкий помел вимагає вибухо- і пожежобезпечної технології, крім того порошки на повітрі гідратуються, злипаються, забивають пневмотраси, при цьому порушується стабільність режимів продувки й, нарешті, різко погіршується екологія в результаті інтенсивного газо- пиловиділення. При використанні порошку силікокальція з високою пружністю пари при температурі рідкої сталі не вдається одержати в металі вміст кальцію $\geq 0,001\%$, що відповідає засвоєнню кальцію $1\pm 2\%$.

Усе вищевикладене й визначило доцільність проведення даної роботи, присвяченій розробці технології обробки сталі в проміжному ковші на МБЛЗ силікокальцієвими, алюмінієвими і із РЗМ дротами.

Мета роботи. Розробка технології модифікування сталі обробкою силікокальцієм і РЗМ у промковші за допомогою їхнього введення у вигляді порошкового дроту, вибір оптимальних режимів введення, що ефективно впливають на якість сталі.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити такі завдання:

1) Відпрацювання технології введення силікокальцію порошковим дротом у метал проміжного ковша на МБЛЗ за допомогою універсального двохструмкового трайбапарата.

2) Проведення серії дослідно-промислових плавок по обробці металу в проміжному ковші МБЛЗ замковими порошковими стрічками із силікокальцієм і алюмінієм за допомогою переносного (стрічкового) трайбапарата.

3) Аналіз отриманих результатів з рекомендаціями із промислового освоєння

технології виробництва низькосірчаних марок сталі з використанням алюмінієвих й порошкових дротів із силікокальцієм при позапічній обробці.

Об'єкт дослідження: процес позапічної обробки сталі порошковими дротами з силікокальцієм та РЗМ.

Предмет досліджень: закономірності і механізми впливу порошкоподібних матеріалів на якість сталі при обробці металу.

Методи досліджень: електронна фрактографія, рентгеноспектральний аналізу, мікроскопічний аналіз, оптико-металографічний аналіз, петрографічний, хімічний аналізи.

Наукова новизна:

1. Встановлено, що модифікатори приводять до збільшення щільності металу й змінюють дендритну структуру в $1,3\div 1,6$ раз. Обробка модифікаторами веде до зменшення дендритної неоднорідності по сірці в сталі. Також виявлене, що швидкість кристалізації сталі зростає на $10\div 15$ %, чим у звичайної. Використання модифікаторів приводить до дрібнювання зерна й пригнічує утворення стовпчастої структури в металі, що кристалізується.

2. Запропоновано механізм взаємодії Са з домішками. При введенні в рідкий метал кальцій випаровується, пари кальцію, проходячи через товщу металу, взаємодіють із киснем і відновлюють глинозем, що утворився в металі при попередньому розкисленні алюмінієм. Оксиди й оксисульфідни, що утворювалися, частково видаляються з розплав за рахунок інтенсивного перемішування металу парами кальцію. Продукти взаємодії, що залишилися в металі, кальцію з киснем і сіркою є центрами, на яких відбувається наступне виділення оксидів, що утворюються, і сульфідів при зниженні температури металу.

3. Встановлено, що введення кальцію в сталь знижує кількість великих оксидних і сульфідних включень і переводить їх у дрібні глобулярні оксисульфідни кальцію з більш рівномірним розподілом їх по перетину сляба, які при прокатці не деформуються.

Практичне значення:

1. Розроблена й випробувана в промислових умовах конвертерного цеху технологія обробки рідкого металу в розливному ковші на УДМ і МБЛЗ замковим і беззамковим порошковим дротом із силікокальцієм і РЗМ, як альтернатива технології введення силікокальцію в струмені аргону й з метою поліпшення якості металу.

2. Установлено, що беззамковий порошок дріт не має необхідну якість для обробки рідкої сталі через нерівномірний і низький коефіцієнт заповнення, розкриття оболонки й просипання наповнювачів, що приводить до порушення стабільності введення такого дроту в рідкий метал і піроефекту поверхні розплаву й, отже, погіршує екологію виробництва.

3. Розроблені режими введення порошкових дротів, що містять силікокальцій і РЗМ, у прийомну секцію промковша, які забезпечують рівномірний розподіл елементів, що вводяться, сталі з високим ступенем їх засвоєння й не порушує шлаковий режим у промковші й кристалізаторах МБЛЗ.

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, включених в кваліфікаційну магістерську роботу, доповіли на: XX науково-технічній конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості. Том I. (Запоріжжя, 2015 р.); наукових семінарах кафедри металургії чорних металів Запорізької державної інженерної академії.

Публікації

Основні результати роботи викладені в збірці магістерських робіт і тезах конференції.

Структура і об'єм роботи

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 38 найменувань, викладена на 91 сторінці машинописного тексту, включаючи 15 рисунків, 26 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, показано наукову новизну роботи і практичну цінність отриманих результатів.

У першому розділі приведений аналіз існуючих способів модифікування рідкої сталі, а також проведено визначення впливу модифікаторів на якість сталі, що розливається.

Одним з основних методів, що сприяють поліпшенню механічних і технологічних властивостей сталей, є модифікування. Під модифікуванням розуміється процес активного регулювання первинної кристалізації або зміни ступеня дисперсності фаз, що кристалізуються, шляхом уведення в розплав малих добавок окремих хімічних елементів або їх з'єднань. У результаті модифікування сплави здобувають більш тонку структуру, що поліпшує їхні механічні властивості.

Модифікатори ділять на дві групи. Модифікатори першого роду - поверхнево-активні речовини - адсорбуються на зародках, що виникають на центрах кристалізації, і гальмують їхній ріст, у результаті чого з'являється більша кількість нових зародків, ріст яких стає можливим через зменшення концентрації модифікатора на їхній поверхні. Модифікатори другого роду - так звані модифікатори інокулюючої дії (феросиліцій, силікокальцій, алюміній, сплави титану, цирконію, деяких лантановидів, барію, стронцію) - полегшують утворення у розплаві центрів кристалізації, що виявляють вплив на зародження кристалів металевої фази при затвердінні.

Роль модифікаторів при кристалізації сталі зводиться до того, що будучи поверхнево-активними елементами, вони зменшують роботу утворення зародка, сприяють його більшій стійкості.

На сучасному етапі виробництва сталі застосовуються два способи введення порошкоподібних модифікаторів у рідкий метал:

- вдмухування в струмені газа-носія;
- введення у вигляді дроту або стрічки, заповненої модифікатором.

Вдування в струмені газа-носія порошкоподібних модифікаторів позитивно впливає на перемішування рідкого металу. Однак при цьому відбувається зниження ступеня їх засвоєння, тому що модифікатори I роду, у тому числі Са, представляють собою елементи, що легко випаровуються. При вдуванні відбувається насичення рідкого металу газами: азотом, киснем і воднем за рахунок утворення великої контактної поверхні рідкого металу з атмосферою при інтенсивному перемішуванні, незахищеної шаром шлаків.

При введенні порошкових дровових модифікаторів спостерігається високий ступінь рафінування й засвоєння хімічно активних з киснем елементів, цьому сприяє відсутність контакту поверхні рідкого металу з окисною атмосферою цеху. Процес можна проводити в сталерозливному й проміжному ковшах, і в кристалізаторі МБЛЗ.

У цей час у вітчизняній металургії для обробки рідкого металу використовують

наступні види дрових порошкових модифікаторів (ДПМ):

- стрічкові порошкові модифікатори, що мають коробчасту конструкцію й залежно від способу з'єднання кромки у металевій оболонці бувають беззамкові, однозамкові й двохзамкові;

- дрові порошкові модифікатори, що мають трубчасту конструкцію - беззамкову або однозамкову.

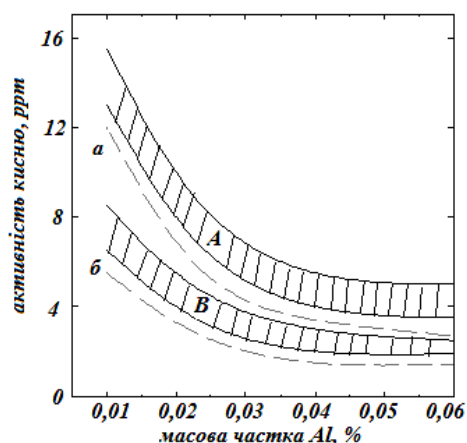
Процес із використанням ДПМ є екологічно більш чистим і високоефективним відносно підвищення якості безперервнолитих слябів і готового прокату. Устаткування по введенню порошкового дроту в рідкий метал надійно в експлуатації й просто в управлінні.

Обробка кальцієм є випадком мікролегування рідкої сталі з метою зміни складу і морфології оксидних і сульфідних включень і підвищити чистоту сталі.

Коли кальцій уводять глибоко в розплав у вигляді сплавів Ca-Si, Ca-Al або чистого Ca у суміші з нікелем або порошком заліза, реакції, що протікають слідом за цим у рідкій сталі, однакові.

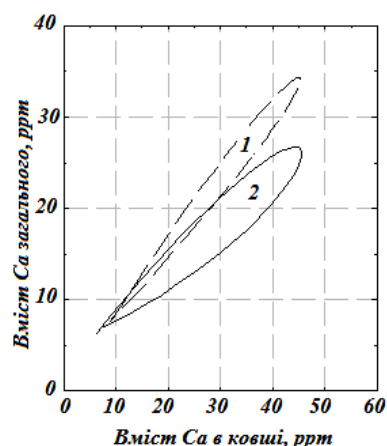
Розкислення сталі алюмінієм у ході обробки кальцієм пояснюється зниженням активності глинозему внаслідок перетворення глиноземних включень в алюмінати кальцію. Це добре підтверджують промислові дані аналізу вмісту кисню до й після введення порошкового дроту із силікокальцієм (рис. 1).

Як свідчать промислові дані (рис. 2), кількість кальцію, що залишається в сталевому злитку, більше, чим у ковші після обробки кальцієм.



А - перед введенням порошкового дроту із силікокальцієм; В - після введення; сталь при температурі 1600 ± 10^0 С у порівнянні з рівноважними залежностями для чистого Al_2O_3 (а - активність 1,0) і включень рідкого алюмінату кальцію (б - активність 0,064)

Рисунок 1 – Промислові дані аналізу вмісту кисню до й після введення порошкового дроту із силікокальцієм



1-злиток; 2- промківш

Рисунок 2 – Порівняння вмісту кальцію в сталі, призначеної для розливання в злитки й безперервного розливання

Наведені дані є основою для розробки технології модифікування сталі (09Г2С, 17Г1СУ, Ст3сп) у кристалізаторі кальцієм, алюмінієм, РЗМ і ЛЗМ стосовно до об'єкту даної роботи.

У другому розділі відпрацьовані оптимальні режими введення порошкового дроту в промківш, розроблена й випробувана технологія модифікування сталі при безперервному розливанні.

Спосіб введення в рідку сталь сумішей і сплавів у вигляді порошку, спресованого в сталеву трубчасту оболонку (порошковий дріт - ПД) одержав широке поширення в ряді промислово розвинених країн із середини 80-х років ХХ сторіччя.

Матеріалом дослідження були промислові сталі марок 09Г2С, 17Г1СУ, 09Г2БТ і ін., виплавлені в 350-ти тонних конвертерах.

Модифікування сталі проводили в промковші за допомогою введення порошкових дрітів, що містять силікокальцій або суміші РЗМ (75%) + SiCa (25%) або РЗМ (50%) + SiCa (50%) або SiCa (50%) + Al (50%).

У цей час у конвертерних цехах впроваджується технологія введення порошкового дроту з наповнювачем із силікокальцію на УДМ замість технології вдмухування порошку несучим газом. Ефективність даної технології представлена в табл. 1.

Таблиця 1 – Зіставлення результатів введення силікокальцію різними методами при виробництві сталі 09Г2ФБ

Спосіб введення SiCa	Середній вміст Са у сталі, % · 10 ⁻⁴		Марка SiCa	Витрата, кг/т	Кількість плавки, що містять < 0,0010 % Са на УДМ/кристалізатор, %	Засвоєння УДМ/кристалізатор, %
	УДМ	Кристалізатор				
Вдмухування	–	22*	СК–25	1,5	–/3,0	–/3,8
Дріт	20	18	СК15–20	0,8	3,8/7,9	8,7/7,9
Дріт	38	–	СК15–20	1,1÷1,2	0,4/9,5(–)	10,9/12,0
Дріт	34	17	СК–15	1,0÷1,1	0,0/13,1	11,1/12,2
Дріт	36	16	СК–15	1,5÷1,6	0,0/11,6	8,0/8,5
Дріт	27	12	СК–15	1,8÷2,1	3,3/6,5	–
Дріт	32	16	СК–15	1,9÷2,2	1,7/6,7	–

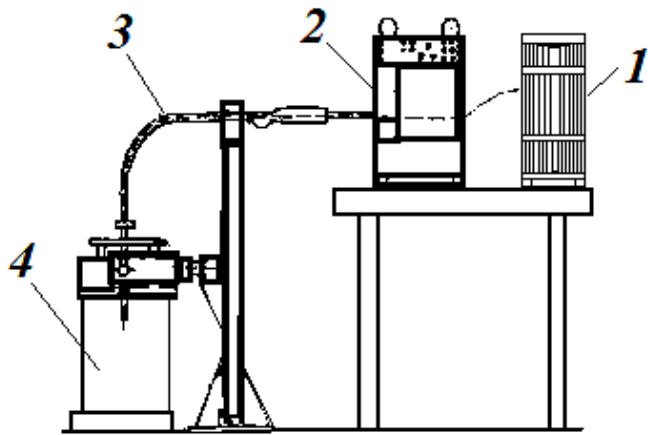
Були проаналізовані основні параметри застосовуваних порошкових дрітів (табл. 2).

Таблиця 2 – Технічні характеристики порошкового дроту із силікокальцієм різних фірм-виробників

Показник	Виробник					
	Фірма "Метал"			НП МП "Инмет"	"AFFIVAL"	
Діаметр дроту, мм	10	13	14	10	9	13
Маса бухти, кг	До1000	850÷890	815÷870	959÷1000	1337	1256
Кількість порошку в погонному метрі, г	100÷120	268	218÷236	140÷150	90	215
Довжина дроту в бухті, м	до 2000	1940÷2040	–	3200÷3500	6400	3100
Коефіцієнт заповнення	0,40÷0,445	0,58÷0,62	0,58÷0,59	0,50÷0,54	0,4	0,4
Марка SiCa	СК-15	СК-15	СК-15	СК-15	СК-30	СК-30
Товщина стінки дроту, мм	0,3÷0,4	–	0,35÷0,36	0,4	0,4	0,4
Кількість порошку в бухті, кг	до240	520÷547	476÷518	448÷525	576	666
Вміст Са в дроті, %	до20	–	17÷18	до 20	–	–

Зараз конвертерне виробництво повністю переходить на порошковий дріт, тому що зіставлення результатів двох технологій показало перевагу порошкового дроту в порівнянні із вдмухуванням SiCa у струмені аргону.

Схема подачі дроту в ківш трайб-апаратом показана на рис. 3.



1 - бунт дроту; 2 - апарат для подачі дроту в розплав; 3 - напрямна труба; 4 - ківш із рідкою сталлю

Рисунок 3 – Схема подачі дроту в ківш

Для проведення експериментів використовували беззамковий порошковий дріт виробництва фірми "Метал" із силікокальцієм марки СК-30 діаметром 10 мм у сталевій оболонці товщиною $0,50 \div 0,70$ мм.

Для порівняння отриманих результатів нижче представлені порівняльні дані (вміст сірки в сталі до обробки $0,005 \div 0,013$) дослідних з обробкою ДПМ і порівняльних плавок із вдмухуванням силікокальцію, представлених у таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати плавок з обробкою й без обробки рідкого металу силікокальцієм на УДМ

№ п/п	№ плавки	Обробка шлаками	Витрата ДПМ або порошку, кг	Витрата кальцію, кг/т	Склад оброблюваного металу, %			Температура оброблюваного металу, °С	Вміст сірки в металі, %		Ступінь десульфурації, %
					С	Mn	Si		до обробки	після обробки	
ДПМ с SiCa											
1	7132	ТШС	675	0,18	0,16	0,46	0,19	1875	0,028	0,021	25,0
2	6872	ТШС	600	0,16	0,19	0,46	0,20		0,011	0,009	18,2
3	5752	ТШС	750	0,20	0,21	0,42	0,16	1575	0,006	0,005	16,6
4	7318	ТШС	675	0,18	0,16	1,28	0,28	1590	0,012	0,008	33,0
5	7320	ТШС	300	0,08	0,19	1,23	0,31	1573	0,012	0,010	16,7
6	7168	н.св.	675	0,18	н.св.	н.св.	0,31	н.св.	0,017	0,012	29,4
7	7172	СШ	675	0,18	н.св.	н.св.	0,34	н.св.	0,013	0,010	23,1
8	7038	СШ	250	0,07	0,10	1,46	0,16	1570	0,007	0,005	28,6
Вдмухування SiCa											
1	7040	СШ	850	0,77	0,10	1,46	0,23	1585	0,005	0,004	20,0
2	7041	СШ	850	0,77	0,10	1,62	0,16	1630	0,009	0,005	44,4
3	6475	СШ	520	0,47	0,10	1,80	0,23	1583	0,003	0,003	0,0
4	6477	СШ	520	0,46	0,10	1,71	0,22	1588	0,013	0,014	-7,7
5	6478	СШ	520	0,47	н.св.	н.св.	0,15	н.св.	0,004	0,003	25,0
середні значення			625	0,59	0,10	1,65	0,198	1597	0,0068	0,0054	16,3

Результати дослідження ступеню засвоєння кальцію при обробці металу ДПМ представлено в таблиці 4.

З даних таблиці 4 випливає, що середній ступінь засвоєння кальцію при введенні його ДПМ відповідає $11 \div 13$ %.

Крім того, як помітно з таблиці 5 введення силікокальцію порошковим дротом позитивно впливає на відновлення марганцю й заліза з покривного шлаку, так вміст MnO у шлаках знижується на $1,3 \div 1,6$ %, вміст $Fe_{заг}$ - на $2,7 \div 8,0$ %.

Таблиця 4 – Результати дослідження ступеню засвоєння кальцію при обробці металу ДПМ

№ плавки	Вміст кальцію, %		Ступінь засвоєння кальцію, %
	до обробки	Після обробки	
7318	0,001	0,004	16,6
7132	0,001	0,002	5,5
7168	0,001	0,004	16,6
Середні значення	0,001	0,003	12,2

Таблиця 5 – Хімічний склад покривного шлаку до й після введення силікокальцію порошковим дротом

№ плавки	Витрата порошкового дроту, кг/ківш	Проби шлаків	Хімічний склад шлаків, %								
			SiO ₂	CaO	MgO	Fe _{заг}	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S	TiO ₂
7038	250	До	9,57	50,30	2,52	4,47	2,22	30,60	0,130	0,188	1,70
		після	10,32	51,15	3,65	1,80	0,93	32,40	0,058	0,206	1,85
6872	600	до	15,68	54,80	1,72	11,30	3,61	11,70	0,050	0,261	0,40
		після	18,60	55,30	3,52	3,32	1,80	19,20	0,300	0,248	0,40

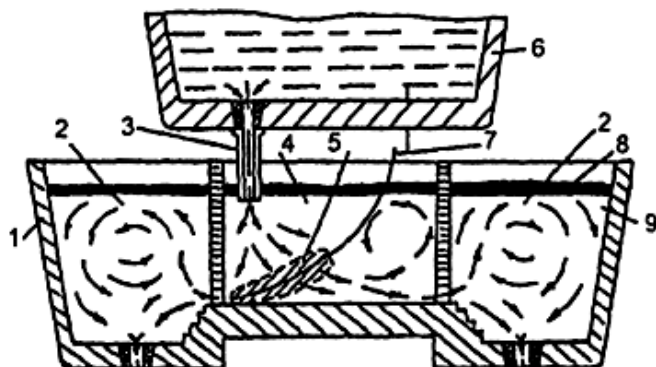
Нижче представлені середні по кількості випробувань зразків показники механічних властивостей дослідних і порівняльних плавок (табл. 6).

Таблиця 6 – Середні значення механічних властивостей здавального контролю готового прокату дослідних плавок

Марка сталі	Технологія	Кількість плавок, шт	Кількість випробуваних зразків, шт.	Границя текучості, Н/мм ² , σ _T	Тимчасовий опір, Н/мм ² , σ _B	Відносне подовження, %, δ	Ударна в'язкість, Дж/см ²				DWTT, %
							KCV ₂₀	KCV ₁₅	KCV ₂₀	KCV ₄₀	
09Г2БТ	Дослідна	2	12	514,1	577,1	22,15	–	137,9	–	121,7	97,5
Ст3сп	Дослідна	4	17	302,85	450,9	29,3	130,8	–	83	–	102,9
	Порівняльна	3	6	300,0	460,0	28,5	110,5	–	81,5	–	93,0
17Г1СУ	Дослідна	5	19	397,1	546,3	27,4	69,8	–	72,8	–	86
	Порівняльна	2	8	405,9	556,7	29,6	68,8	–	65,1	–	85,6
Е-32	Дослідна	1	2	350	515	31,0	203	–	н.св.	–	–
	Порівняльна	2	10	363,5	511,9	30,3	153,4	–	114,5	–	–

З наведених вище даних випливає, що механічні властивості сталі 09Г2ФБ, обробленої порошковим дротом із силікокальцієм, перебувають на рівні механічних властивостей цієї сталі порівняльних плавок, а сталі марок Ст3сп, 17Г1СУ, Е32 – мають поліпшення по ударній в'язкості.

Введення порошкової стрічки робили в трисекційний проміжний ківш (рис. 4) у прийомну секцію.



1 - трисекційний проміжний ківш; 2 - розливні секції; 3 - захисна труба; 4 - прийомна секція; 5 - область спадних потоків; 6 - сталерозливний ківш; 7 - порошковий дріт; 8 - покривний шлак; 9 - метал

Рисунок 4 – Схема введення порошкового дроту в прийомну лійку проміжного ковша

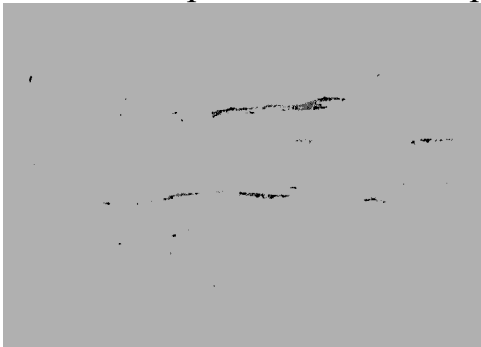
Хімічний склад проб шлаків, узятих із кристалізатора до введення силікокальцію (проби № 1) і в процесі обробки порошковим силікокальцієвим дротом (проба № 2), наведений у табл. 7.

Таблиця 7 – Хімічний склад шлаків

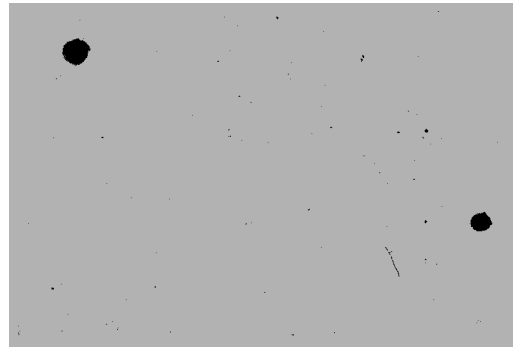
№ проби	Хімічний склад, % мас.										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe _{заг}	Mn	MnO	CaO	MgO	луг.	C
1	33,80	12,60	1,87	1,77	2,68	3,50	4,50	26,50	1,44	6,70	0,95
2	31,80	18,80	1,84	1,59	2,52	3,62	4,71	28,50	1,53	5,50	0,83

При введенні в рідкий метал кальцій випаровується, пари кальцію, проходячи через товщу металу, взаємодіють із киснем і відновлюють глинозем, що утворився в металі при попередньому розкисненні алюмінієм. Оксиди й оксисульфідні, що утворювалися, частково видаляються з розплаву за рахунок інтенсивного перемішування металу парами кальцію. Продукти взаємодії, що залишилися в металі, кальцію з киснем і сіркою є центрами, на яких відбувається наступне виділення оксидів, що утворюються, і сульфідів при зниженні температури металу.

При введенні силікокальцію утворюються легкоплавкі продукти взаємодії з киснем $Al_2O_3 \cdot CaO \cdot SiO_2$ - алюмокальцієві силікати. Глобулярна форма останніх говорить про те, що в рідкому металі вони були рідкими (рис. 5). Коагулюючи надалі із сульфідами, оксиди, що містять кальцій, утворюють складні оксисульфідні, які до останнього моменту кристалізації перебувають, здебільшого, у рідкому стані. Із цієї причини вони не захоплюються зростаючими кристалами, а відтискуються на фронт кристалізації й застигають наприкінці кристалізації на границях зерен. Проведеними численними дослідженнями встановлено, що кількість строчечних глиноземистих включень і витягнутих включень сульфідів марганцю, характерних для неопрацьованої сталі, із присадками Ca скорочується.



а



б

а - деформовані включення (Fe, Mn)S, х 400; б - глобулярні включення Al_2O_3+CaS , х 800

Рисунок 5 – Зміна морфології сульфідних включень після обробки силікокальцієвим дротом

Проведеними металографічними дослідженнями встановлено, що присадка Ca модифікує НВ. Тип включень - оксиди, силікати, сульфідні. Включення, що мають глобулярну форму, являють собою алюмінатні включення, оточені шаром з високим вмістом Ca й S. Включення розосереджені по товщині металу, без певної орієнтації. Введення кальцію в сталь знижує кількість великих оксидних і сульфідних включень і переводить їх у дрібні глобулярні оксисульфідні кальцію з більш рівномірним розподілом їх по перетину сляба, які при прокатці не деформуються (рис. 6).

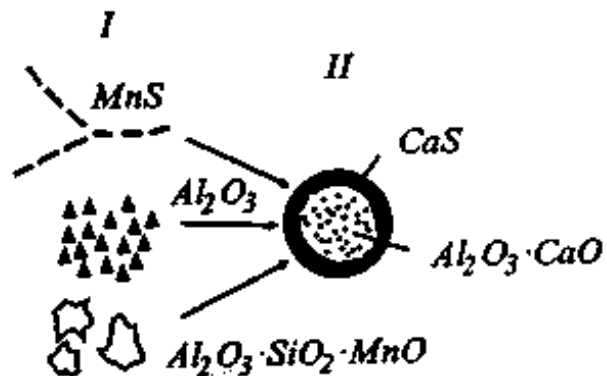


Рисунок 6 – Видозміни природи й морфології неметалевих включень при обробці сталі кальцієм до й після обробки, відповідно

Для відпрацювання технології мікролегування сталі РЗМ за допомогою введення порошкового дроту було проведена серія дослідно-промислових плавок сталі 09Г2С. Плавки виплавлялися в 350-ти тонному конвертері, оброблялися синтетичними шлаками під конвертером і продувалися аргоном на УДМ.

Обробка РЗМ проводилася під час розливання шляхом введення порошкового дроту в проміжний ковш і кристалізатор МБЛЗ по наступних варіантах: 1-й – введення порошкового дроту під струмінь при розливанні зі сталерозливного в проміжний ківш - серія з 6 плавок; 2-й – введення дроту в районі стопора проміжного ковша - серія з 7 плавок; 3-й – введення дроту в кристалізатор.

У таблиці 8 наведені результати по визначенню залишкового вмісту церію й кальцію для обох варіантів складу лігатури в кожній з оброблених плавок.

Таблиця 8 – Вміст церію й кальцію в металі дослідних плавок, оброблених шляхом введення порошкового дроту під струмінь

Умовний №	Склад модифікатора	Церій, % мас.	Кальцій, % мас.
1	75 % РЗМ + 25 % SiCa	0,005	0,002
2	50 % РЗМ + 50 % SiCa	0,003	0,002
3	75 % РЗМ + 25 % SiCa	0,004	0,001
6	75 % РЗМ + 25 % SiCa	0,005	0,001
11	50 % РЗМ + 50 % SiCa	0,003	0,002
12	50 % РЗМ + 50 % SiCa	0,003	0,002

Якщо при введенні порошкового дроту під струмінь, вміст сірки в металі, відібраному із кристалізатора, знижувався на 0,002÷0,003 %, то при введенні порошкового дроту під стопор, зниження сірки не перевищувало 0,001÷0,002 %.

Результати експерименту наведено в таблиці 9.

Таблиця 9 – Вміст церію й кальцію в металі дослідних плавок, оброблених шляхом введення порошкового дроту під стопор проміжного ковша

Умовний №	Склад модифікатора	Церій, % мас.*	Кальцій, % мас.
4	75 % РЗМ + 25 % SiCa	0,007	0,002
5	50 % РЗМ + 50 % SiCa	0,005	0,003
7	75 % РЗМ + 25 % SiCa	0,006	0,002
8	75 % РЗМ + 25 % SiCa	0,007	0,002
9	75 % РЗМ + 25 % SiCa	0,006	0,003
10	50 % РЗМ + 50 % SiCa	0,004	0,002
14	50 % РЗМ + 50 % SiCa	0,005	0,003

* - проби на церій і кальцій відбиралася із кристалізатора.

Результати визначення ступеню засвоєння церію й кальцію наведено в таблиці 10.

Таблиця 10 – Результати ступеню засвоєння церію й кальцію залежно від способу введення порошкового дроту

№ п/п	Спосіб введення	Швидкість введення, м/сек	Витрата модифікатора, кг/т					Вміст у металі, % мас.		Ступінь засвоєння, %	
			загальний	PЗМ	Si	Ce	Ca	Ce	Ca	Ce	Ca
1	під струміль	0,6÷0,7	1,3÷1,4	1,0	0,35	0,15	0,11	0,004÷0,005	0,001÷0,002	26÷33	9÷18
2	під стопор	0,6÷0,7	1,3÷1,4	1,0	0,35	0,15	0,11	0,006÷0,007	0,002÷0,003	40÷47	18÷27
3	у кристалізатор	0,1÷0,2	0,33	0,25	0,08	0,04	0,03	0,002÷0,003	0,001	50÷75	30

У таблиці 11 наведені результати по визначенню ударної в'язкості й відносного звуження в напрямку товщини прокату, проведені на металі ряду плавок із числа оброблених РЗМ і силікокальцієм.

Таблиця 11 – Механічні властивості сталі серії дослідних плавок у напрямку товщини прокату

Ум. №	Варіант обробки	Вміст Ce й Ca, % мас		Товщина листа, мм	Механічні властивості*					
		Ce	Ca		Основний метал			Ліквацийна зона		
					ψ , %	KCV _{+20°C} , МДж/м ²	KCV _{-40°C} , МДж/м ²	ψ , %	KCV _{+20°C} , МДж/м ²	KCV _{-40°C} , МДж/м ²
1	75% РЗМ + 25% SiCa під струміль	0,005	0,002	50	$\frac{34}{61}$	$\frac{1,32}{1,64}$	$\frac{0,56}{0,81}$	$\frac{7}{25}$	$\frac{0,12}{0,25}$	$\frac{0,06}{0,10}$
2	50% РЗМ + 50% SiCa під струміль	0,003	0,002	50	$\frac{38}{70}$	$\frac{1,40}{1,72}$	$\frac{0,48}{0,64}$	$\frac{9}{24}$	$\frac{0,14}{0,23}$	$\frac{0,04}{0,07}$
3	75% РЗМ + 25% SiCa під струміль	0,007	0,002	50	$\frac{30}{58}$	$\frac{1,22}{1,56}$	$\frac{0,58}{0,82}$	$\frac{12}{26}$	$\frac{0,15}{0,31}$	$\frac{0,07}{0,12}$
4	50% РЗМ + 50% SiCa під струміль	0,005	0,003	50	$\frac{42}{64}$	$\frac{1,28}{1,52}$	$\frac{0,49}{0,68}$	$\frac{10}{33}$	$\frac{0,16}{0,27}$	$\frac{0,05}{0,09}$
5	75% РЗМ + 25% SiCa під струміль	0,006	0,003	40	$\frac{44}{68}$	–	–	$\frac{10}{32}$	–	–
6	50% РЗМ + 50% SiCa під струміль	0,003	0,002	36	$\frac{36}{60}$	–	–	$\frac{12}{28}$	–	–
7	75% РЗМ + 25% SiCa під струміль	0,0025	0,001	50	$\frac{27}{50}$	$\frac{1,44}{1,60}$	$\frac{0,66}{0,74}$	$\frac{8}{19}$	$\frac{0,10}{0,18}$	$\frac{0,08}{0,06}$

* чисельник - звичайна виплавка; знаменник - обробка РЗМ і SiCa

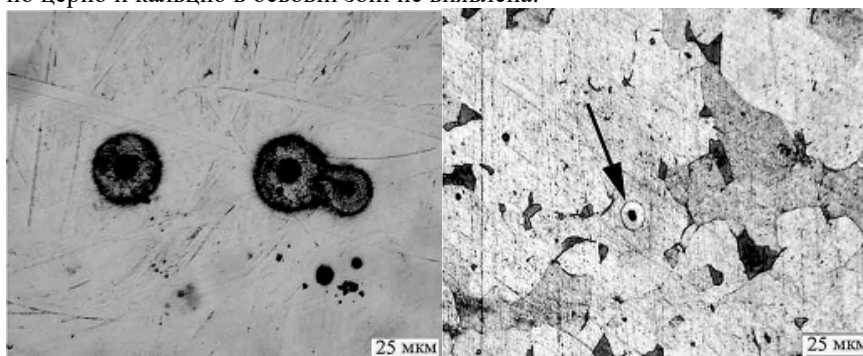
У таблиці 12 наведені результати по визначенню елементарного складу зони осьової ліквациї, з яких випливає, що введення церію сприяє значному зниженню ступеня збагачення ліквацийної зони фосфором, сіркою, титаном, марганцем, кремнієм. Слід зазначити значний розкид результатів.

Характерні неметалічні включення й мікроструктура сталі 09Г2С показані на рис. 7.

Таблиця 12 –Зміна хімічного складу зони осьової ліквації сталі 09Г2С при обробці церієм і кальцієм*

Обумовлений хімічний елемент	Середній вміст у сталі, % мас.	Середній вміст в осьовій зоні, % мас.	Коефіцієнт ліквації		
			середній	min	max
P	<u>0,018</u>	<u>0,068</u>	<u>3,8</u>	<u>2,6</u>	<u>4,9</u>
	0,018	0,039	2,2	1,4	2,5
S	<u>0,009</u>	<u>0,040</u>	<u>4,5</u>	<u>3,1</u>	<u>7,0</u>
	0,008	0,022	2,8	2,0	4,6
Mn	<u>1,46</u>	<u>2,62</u>	<u>1,8</u>	<u>1,2</u>	<u>2,4</u>
	1,40	1,68	1,3	1,1	1,5
Ti	<u>0,005</u>	<u>0,018</u>	<u>3,6</u>	<u>2,8</u>	<u>5,2</u>
	0,005	0,012	2,4	2,1	3,0
Si	<u>0,62</u>	<u>1,30</u>	<u>2,1</u>	<u>1,5</u>	<u>2,3</u>
	0,68	1,70	1,6	1,2	1,9
Al	<u>0,031</u>	<u>0,038</u>	<u>1,3</u>	<u>1,1</u>	<u>1,4</u>
	0,030	0,040	1,3	1,2	1,4

* чисельник - сталь звичайної виплавки, знаменник - оброблена порошковим дротом з 75 % PЗМ і 25 % SiCa. Ліквація по церію й кальцію в осьовій зоні не виявлена.



а)

б)

а) звичайна виплавка; б) обробка PЗМ і SiCa

Рисунок 7 – Неметалічні включення й мікроструктура сталі 09Г2С

У таблиці 13 наведені дані аналізу морфології неметалевих включень декількох з досліджуваних плавок (відповідно до ДСТ 1778-70, метод III) до й після обробки їх порошковим дротом.

Таблиця 13 – Неметалічні включення в осьовій зоні сталі 09Г2С дослідних плавок

Ум. №	Забруднення сталі НВ у балах (ДСТ 1778-70, III)						
	оксиди		силікати			сульфіди	нітриди
	Рядкові	точкові	крихкі	пластичні	недеформовані		
1	<u>2,5</u>	<u>1,0</u>	<u>4,0</u>	<u>3,0</u>	<u>4,0</u>	<u>2,5</u>	<u>0,5</u>
	1,0	1,0	3,0	3,0	1,0	1,5	0,0
2	<u>4,0</u>	<u>2,0</u>	<u>3,5</u>	<u>2,5</u>	<u>3,5</u>	<u>2,0</u>	<u>0,5</u>
	2,0	2,5	3,0	2,0	3,0	1,0	0
4	<u>3,0</u>	<u>1,0</u>	<u>3,5</u>	<u>2,0</u>	<u>2,5</u>	<u>4,0</u>	<u>1,0</u>
	1,5	1,5	2,5	1,0	2,5	2,5	0,5
5	<u>2,5</u>	<u>2,0</u>	<u>2,5</u>	<u>3,5</u>	<u>2,0</u>	<u>3,5</u>	<u>1,0</u>
	1,0	2,5	2,5	1,0	1,5	2,0	0,5
8	<u>3,5</u>	<u>1,0</u>	<u>4,0</u>	<u>1,0</u>	<u>4,0</u>	<u>3,5</u>	<u>0,5</u>
	2,0	0	3,0	0,5	2,0	1,0	0
12	<u>2,5</u>	<u>1,0</u>	<u>2,0</u>	<u>1,0</u>	<u>2,0</u>	<u>3,0</u>	<u>0,5</u>
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0

* чисельник - сталь звичайної виплавки, знаменник - оброблена PЗМ і силікокальцієм

У третьому розділі розглянуті питання охорони праці та техногенної безпеки, дається характеристика шкідливих умов виробництва, санітарно-гігієнічних умов праці, описуються заходи, які забезпечують комфортні умови праці. Також зроблений розрахунок межі вогнестійкості суцільних конструкцій при односторонньому обігріві (за ознакою прогріву).

Висновки

1. Розроблена й випробувана в промислових умовах конвертерного цеху технологія обробки рідкого металу в розливному ковші на УДМ і МБЛЗ замковим і беззамковим порошковим дротом із силікокальцієм і РЗМ.

2. Застосування технології рафінування рідкого металу порошковим дротом із силікокальцієм і в сталерозливному ковші на УДМ дозволяє знизити вміст сірки в сталі, збільшити ступінь засвоєння силікокальцію, поліпшити екологію обробки сталі.

3. Економічна ефективність досягається за рахунок поліпшення якості сталі й підвищення коефіцієнта засвоєння матеріалів, що вводяться, так збільшення ступеня засвоєння кальцію становить із 1÷2 % при вдмухуванні до 11÷12 % при введенні беззамкового порошкового дроту.

4. Установлене, що беззамковий порошковий дріт не має необхідну якість для обробки рідкої сталі через нерівномірний і низький коефіцієнт заповнення, розкриття оболонки й просипання наповнювачів.

5. Експериментально підтверджує, що обробка рідкого металу замковою порошковою стрічкою при швидкостях її введення більш 1,0÷2,0 м/сек приводить у зв'язку з незначною твердістю та жорсткістю стрічки в поздовжньому напрямку до її спливання на поверхню металу.

6. Зіставлення сучасних способів введення РЗМ в рідку сталь показало, що введення їх за допомогою порошкового дроту має найбільш високі техніко-економічні показники, чим інші способи.

7. Розроблені режими введення порошкових дротів, що містять силікокальцій і РЗМ, у прийомну секцію промковша, які забезпечують рівномірний розподіл елементів.

8. Установлено, що обробка сталі в прийомній секції промковша МБЛЗ порошковими дротами позитивно впливає на зниження осьової структурної й хімічної неоднорідності, на зменшення ступеня забруднення сталі великими неметалічними включеннями, на модифікування й рівномірний їхній розподіл у сталі, що забезпечує, у цілому, підвищення ударної в'язкості, холодостійкості й ізотропності товстолистого прокату.

Список опублікованих магістрантом робіт

1. Ляшко Є.О. Вплив обробки безперервнолитої сталі 09Г2С рідкісноземельними металами та силікокальцієм на структуру й властивості литого й катаного металу / Є.О. Ляшко, О.Г.Кириченко // Збірник наукових праць магістрантів кафедри МЧМ. Випуск 11. - Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2015.- С.66-73.

2. Ляшко Є.О. Дослідження впливу знесірчувальної здатності шлаків доменної печі / Є.О.Ляшко // Матеріалі ХХ науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості : Том І. / Запорізька держана інженерна академія. - Запоріжжя: ЗДІА, 2015.- С. 10.