

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М.ПОТЕБНИ

Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота / проект**

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз та вдосконалення комплексної позапічної технології обробки сталі

Виконав: студент II курсу, групи 8.1361-мчм  
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Металургія чорних металів

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

С.В. Триченко

(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.х.н., с.н.с. Прутцьков Д.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц., к.т.н., доц. Нестеренко Т.М.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 136 Металургія  
(код та назва)  
Освітня програма Металургія чорних металів  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« 02 » 06 2022 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)  
Гриценку Сергію Віталійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз та вдосконалення комплексної позапічної технології обробки сталі

керівник роботи Прутцьков Дмитро Володимирович, д.х.н., проф.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)  
затверджені наказом ЗНУ від « 02 » червня 2022 року № 597-с

2 Строк подання студентом роботи 12.12.2022

3 Вихідні дані до роботи Дослідити технологічні можливості використання комплексного підходу для позапічної обробки сталі

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
Реферат; вступ; Розділ 1 Літературний огляд по способам позапічної обробки металу інертними газами, твердими шлаковими сумішами і РЗМ; Розділ 2 Методика дослідження технології комплексної обробки сталі інертними газами, твердими шлаковими сумішами і лігатурами з РЗМ; Розділ 3 Дослідження впливу комплексної обробки на структуру злитка і якість металопродукції; Розділ 4 Охорона праці та техногенна безпека; Висновки; Перелік джерел посилання; Додаток А

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) креслень



## 6 Консультанти розділів роботи

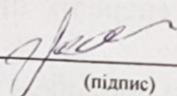
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1 Літературний огляд по способам позапічної обробки металу інертними газами, твердими шлаковими сумішами і РЗМ	Прутцьков Д.В., професор		
Розділ 2 Методика дослідження технології комплексної обробки сталі інертними газами, твердими шлаковими сумішами і лігатурами з РЗМ	Прутцьков Д.В., професор		
Розділ 3 Дослідження впливу комплексної обробки на структуру злитка і якість металопродукції	Прутцьков Д.В., професор		
Розділ 4 Охорона праці та техногенна безпека	Прутцьков Д.В., професор		

7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, реферат	21.11-25.11.2022	
2	Розділ 1 Літературний огляд по способам позапічної обробки металу інертними газами, твердими шлаковими сумішами і РЗМ	26.11-30.11.2022	
3	Розділ 2 Методика дослідження технології комплексної обробки сталі інертними газами, твердими шлаковими сумішами і лігатурами з РЗМ	01.12-04.12.2022	
4	Розділ 3 Дослідження впливу комплексної обробки на структуру злитка і якість металопродукції	05.12-08.12.2022	
5	Розділ 4 Охорона праці та техногенна безпека	09.12-11.12.2022	
6	Висновки, перелік джерел посилання	12.12.2022	

Студент \_\_\_\_\_

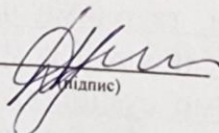


(підпис)

С.В.Гриценко

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) \_\_\_\_\_



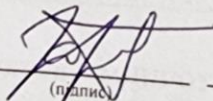
(підпис)

Д.В.Прутцьков

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер \_\_\_\_\_



(підпис)

Ю.О.Белоконь

(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 89 с., 19 табл., 9 рис., 1 дод., 75 джерел

СТАЛЬ, ТЕХНОЛОГІЯ, КІВШ, КОМПЛЕКСНА ОБРОБКА, ЯКІСТЬ, АРГОН, ПРОДУВАННЯ, ШЛАК

Об'єкт дослідження – термодинаміка і кінетика комплексної обробки сталі інертним газом, шлаковими сумішами і лігатурами з РЗМ.

Предмет дослідження – закономірності і механізми фізико-хімічних процесів комплексної технології позапічної обробки сталі.

Мета роботи – вдосконалення технології комплексної обробки сталі з метою забезпечення стабільності механічних властивостей і підвищення якості металопрокату.

Методи дослідження – хімічний аналіз, теоретичні розрахунки, дослідження в напівпромислових і промислових умовах, статистичний аналіз отриманих результатів.

Наукова новизна:

1. Розроблена методика оцінки ефективності десульфурації сталі в ковші різними реагентами. Експериментально встановлено, що максимальний ефект забезпечує обробка сталі ТШС з одночасною продувкою металам інертним газом через шиберний затвор.

2. Розроблена номограма для визначення витрати ТШС при комплексній обробці мартенівської сталі в 300-т ковшах.

Практичне значення:

1. Розроблена технологія отримання високоякісного злитку сталей 10ХСНД і 09Г2С в основу якої комплексне застосування лігатур з РЗМ, твердих шлакових сумішей та інертного газу (азоту).

У розділі 1 представлений обґрунтований вибір простих, надійних і технологічних варіантів обробки сталі в ковші інертним газом, шлаковою су-

мішню і лігатурами з РЗМ, прийнятних для комплексної обробки сталі у великомасштабному мартенівському виробництві.

У розділі 2 досліджено кінетику продувки металу інертним газом у 300-т ковші через шибєрний затвор, кінетика і ефективність спільної обробки сталі твердими шлакоутворюючими сумішами і інертним газом, термодинаміка та кінетика мікролегування сталей відповідального призначення лігатурами з РЗМ в комплексі з продувкою інертним газом і обробкою твердою шлакоутворюючою сумішню.

У розділі 3 наведено результати впливу комплексної обробки сталі марок 10ХСНД і 09Г2С на макроструктуру злитків.

У розділі 4 проаналізовано основні проблеми охорони праці та техногенної безпеки в умовах проведення досліджень в умовах мартенівського цеху.

Запропонована технологія рекомендується для дослідно-промислових випробувань в умовах сталеплавильних підприємств України.

## ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	8
1. Літературний огляд по способам позапічної обробки металу інертними газами, твердими шлаковими сумішами і РЗМ.....	11
1.1. Вибір раціонального варіанта обробки металу в сталерозливних ковшах інертними газами .....	11
1.2. Вибір раціонального варіанта застосування шлакоутворюючих сумішей при комплексній обробці сталі.....	18
1.3. Основні фізичні властивості РЗМ, що визначають особливості їхньої поведінки при обробці сталі.....	19
1.3.1. Взаємодія РЗМ з залізом .....	21
1.3.2. Взаємодія РЗМ з вуглецем .....	22
1.3.3 Взаємодія РЗМ з киснем і сіркою.....	24
1.3.4. Взаємодія РЗМ з фосфором .....	29
1.3.5. Фізичні властивості і структура сполук РЗМ.....	30
1.4. Вплив способу введення, складу і виду добавок на засвоєння РЗМ ...	32
2. Методика дослідження технології комплексної обробки сталі інертними газами, твердими шлаковими сумішами і лігатурами з РЗМ .....	43
2.1. Дослідження впливу продувки металу інертним газом на масообмінні процеси в великовантажному сталерозливному ковші.....	43
2.2. Дослідження впливу продувки металу інертним газом на хімічну однорідність сталі марки 17Г1СУ.....	45
2.3. Ефективність обробки сталі в 300-т сталерозливному ковші твердими шлакоутворюючими сумішами ....	51
2.4. Дослідження засвоєння РЗМ, що вводяться до складу спеціальних комплексних сплавів.....	55
2.5. Дослідження механізму плавлення лігатур на основі РЗМ в сталі.....	56

3. Дослідження впливу комплексної обробки на структуру злитка і якість металопродукції.....	60
4. Охорона праці та техногенна безпека .....	68
4.1 Характеристики повноти безпеки, рівень механізації та автоматизації обраного технічного процесу .....	68
4.2. Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища .....	68
4.3. Опалення і вентиляція .....	70
4.4. Освітлення .....	71
4.5. Індивідуальні засоби захисту.....	72
4.6. Виробничий шум, виробнича вібрація .....	72
4.7. Міри пожежної безпеки мартенівського цеху .....	73
Висновки .....	75
Перелік джерел посилання .....	77
<b>Додаток А</b> Публікації за темою кваліфікаційної роботи .....	85

## Вступ

**Актуальність проблеми.** Продукція металургійного комплексу України займає зараз провідне місце в структурі експорту. Однак, ринки індустриальних країн, що використовують значні кількості імпортованого металу, для сталі Україні практично недоступні через її низьку якість. Причина в тому, що використання у кінцевого споживача більш дорогої, але високоякісної сталі, забезпечує економію 20-25% металу.

Одним з найбільш перспективних напрямків підвищення якості сталі Україні, особливо мартенівської, є її позапічна обробка. На відміну від інших заходів, що вимагають значних капітальних вкладень, позапічна обробка сталі, особливо комплексна, може забезпечити докорінне підвищення якості металопродукції без істотних капітальних, матеріальних та енергетичних витрат.

Теорія і практика сталеваріння свідчить, що найбільш перспективні в забезпеченні стабільності механічних властивостей і підвищення якості металопрокату позапічна обробка сталі інертними газами, шлаковими сумішами і мікролегуєчими добавками на основі рідкоземельних елементів (РЗМ).

Але теоретичні основи одночасної обробки металу трьома перерахованими вище компонентами відсутні. Немає достатнього обсягу достовірної інформації про закономірності плавлення і розчинення лігатур з РЗМ, відомостей про взаємодію РЗМ з компонентами розплаву і видалення неметалевих включень із сталі. Відсутні дослідження впливу інертного газу і шлакових сумішей на структуру і якість металу при використанні їх у комплексі з РЗМ.

Відсутність відомостей про термодинамічні і кінетичні особливості одночасної обробки металу переліченими компонентами і зумовили проведення більш детальних досліджень такої комплексної обробки

**Мета роботи** – вдосконалення технології комплексної обробки сталі з метою забезпечення стабільності механічних властивостей і підвищення яко-



сті металопрокату. За допомогою виконаних досліджень довести технічні показники і необхідність зміни комплексної технології позапічної обробки сталі, що гарантує високу якість та стабільність хімічного складу.

**Завдання роботи** – на основі фізико-хімічних досліджень, використання сучасних металургійних досягнень розробити технологічні передумови технології комплексної позапічної обробки сталі. Це дозволить в значній мірі покращити хід процесу та гарантувати високоякісний кінцевий хімічний склад сталі.

Дана задача буде вирішуватися за рахунок сучасних засобів та методів аналізу та експериментальних підходів.

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

1. дослідити вплив продувки металу інертним газом на масообмінні процеси та хімічну однорідність сталі ковші;
2. оцінити ефективність обробки сталі в 300-т сталерозливному ковші твердими шлакоутворюючими сумішами;
3. дослідити засвоєння РЗМ с сталі;
4. дослідити вплив комплексної обробки на структуру злитка і якість металопродукції.

**Апробація результатів роботи.** Результати досліджень, включених в кваліфікаційну магістерську роботу, доповіли на II Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» (Запоріжжя, 2022); наукових семінарах ІННІ Запорізького національного університету.

### **Публікації**

Основні результати роботи викладені в 1-х тезах конференції.

### **Структура и об'єм роботи**

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 75 найменувань, викладена на 89 сторінках машинописного тексту включаючи 9 рисунків, 19 таблиць.

# 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ПО СПОСОБАМ ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛУ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ, ТВЕРДИМИ ШЛАКОВИМИ СУМІШАМИ І РЗМ

## 1.1. Вибір раціонального варіанта обробки металу в сталерозливних ковшах інертними газами

Узагальнення досвіду розміщення та експлуатації установок для продувки сталі інертними газами в ковші, виконане Укргіпрометом [1], показує, що вибір оптимального рішення в мартенівських цехах вельми обмежений.

У більшості випадків у мартенівських цехах застосовуються прості по конструкції і недорогі установки для продувки сталі інертними газами, призначені для перемішування сталі з метою вирівнювання хімічного складу і температури в об'ємі сталерозливного ковша, підвищення ефективності рафінування сталі шлакоутворюючими сумішами або порошкоподібними реагентами, рідше для охолодження сталі до заданої температури і коригування хімічного складу.

Можна виділити три варіанти технічних прийомів і конструкцій продувних пристроїв, що використовуються в мартенівських цехах:

- варіант з введенням інертного газу через пористі елементи (блоки), встановлені в днищі або стінці ковша;
- продування через неохолоджувану футеровану фурму, що занурюється;
- продування через шибєрний затвор.

У мартенівських і електросталеплавильних цехах, де позапічна обробка сталі ведеться в сталерозливних ковшах невеликої ємності, найчастіше використовується пристрій з підведенням інертного газу через пористі елементи.

Найбільшого поширення в якості пористих елементів отримали пористі вставки, вставки з направленими каналами і кладка ковшової цегли з пористими швами.

Основною характеристикою продувного пристрої - пористої вставки є газопроникність вогнетривкого матеріалу. З одного боку, вона повинна забезпечувати високу інтенсивність подачі газу, з іншого, навіть при відсутності тиску - виключати проникнення сталі або шлаку в пори вставки. Досвід експлуатації пористих вставок показав, що обидві вимоги реалізуються при діаметрі пір 0,6-1,0 мм. Ці значення визначаються феростатичним тиском стовпа металу в ковші, температурою металу і кутом змочування між металом і вогнетривом пористої вставки.

Продувальний пристрій монтується в днищі ковша і складається з двох основних елементів: пористої вставки і гніздової цегли. Пориста вставка має металеву оболонку. Інертний газ підводять по патрубку. Гніздова цегла і пориста вставка виступає над рівнем днища ковша, що охороняє утворення настилу на поверхні вставки після розливання. Весь пристрій кріпиться до зовнішньої частини днища ковша. Пористі вставки розташовуються в зоні, відступаючої від стінки ковша на  $1/3 - 1/2$  радіусу зі зміщенням на кут  $90^\circ$  щодо осі каналу для випуску сталі.

Пористі вставки виготовляють із стійких високоглиноземистих та основних вогнетривів.

Крім складу вогнетривкого матеріалу, велике значення для експлуатаційних характеристик вставки має вигляд її пористості. Відповідно до технології виготовлення вставок вогнетрив виготовляється з неорієнтованою і орієнтованою (спрямованою) пористістю.

Для технології виготовлення вогнетриву з неорієнтованою пористістю характерне використання грубозернистого матеріалу, порівняно низький тиск пресування, додавання пороутворюючих матеріалів. Подачу газу в метал з мінімальними втратами тиску забезпечують вставки з направленою пористістю: у тілі вогнетриву канали для проходження газу орієнтовані вертикально. Вставки цього типу також мають високу міцність, шлакостійкість і стійкість від розмивання, що пояснюється більш високою щільністю вогнетриву і наближенням його властивостей і складу до футеровці сталерозливного ковша.



Знос вогнетривкого матеріалу пористих вставок пов'язаний з механічним і хімічним впливом. У першому випадку вставка розмивається сталлю під час заповнення ковша при випуску і розливанні. У другому випадку вогнетривкі властивості знижуються в результаті контакту вставки зі сталлю, шлаком, розкислювачами і шлакоутворюючими добавками.

Стійкість пористої вставки становить 3-6 плавов.

Основні розміри вставок наведені нижче.

Тип вставки	Діаметр перерізу вставки, мм		Висота вставки, мм
	верхнього	нижнього	
1	130	160	300
2	160	240	260
3	300	300	220

Значно рідше використовують вогнетривкі вставки зі спрямованими каналами. Вставку з направленими каналами виготовляють з шамоту. Інертний газ в ній проходить через вгвинчений патрубков, потім через порожнину і спрямовані канали. Діаметр каналів складає 1-2 мм, їх кількість може бути різною, розташовані вони по концентричній окружності. Вставка з спрямованими каналами при відсутності в патрубку відсічного клапана може бути разової дії, а з відсічним клапаном - багаторазової дії. Операція установки, кріплення і зміни вставок зі спрямованими каналами аналогічна установці в ковші сталерозливного стакану.

Випробувана також продувка металу через пористі щілини між цеглою в днищі ковша. Для продувки металу через все днище ковша між металевою арматурою і робочим шаром футеровки вбудовують газорозподільники, наприклад, у вигляді змійовика з перфорованої трубки, а робочий шар виконують у вигляді кладки зі звичайного ковшового цегли зі швами, заповненими пористої вогнетривкої масою.

Спочатку для продувки металу інертними газами були використані багатоканальні фурми. Однак вони не знайшли широкого застосування із-за незручності в експлуатації, складності виготовлення і низькою стійкості. Тільки з появою стійких пористих вогнетривів з високою газопроникністю цей варі-

ант став основним способом обробки сталі в сталерозливних ковшах провідних вітчизняних металургійних підприємств.

Разом з тим, для великовантажних сталерозливних ковшів варіант продувки металу через пористі елементи невеликих розмірів виявився малоефективним (зважаючи на дуже низькі питомі витрати інертного газу в пори і канали) і складним в експлуатації. Головною причиною експлуатаційних труднощів є проникнення рідких продуктів взаємодії металу і шлаку в пори пористих елементів з утворенням на їх робочій поверхні зони товщиною 30-40 мм, яка важко руйнується газом, що веде до фільтрації газу через кладку ковшів при підвищеному тиску [2].

Більш прийнятним в умовах великомасштабного виробництва варіантом обробки сталі в ковші сталерозливному інертними газами є розроблена Гіпромезом технологія продування металу в ковші інертним газом зверху через занурювані фурми, які на кінці можуть забезпечуватися пористими блоками або просто представляють собою футеровану трубу з вогнетривкими котушками і відкритим центральним каналом.

У більшості випадків це футеровані вогнетривкими котушками сталеві труби з зовнішнім діаметром 43-57 мм і товщиною стінки 10-12 мм. Діаметр циліндричного каналу для виходу газу може бути від 8 до 35 мм.

З метою більшого диспергування струменя газу в рідкому металі вихідні канали занурюваної фурми можуть бути конічними або щілинними (ширина щілини 1-2 мм) з серповидним перетином по периметру фурми. У цьому випадку далекобійність струменя в рідкому металі збільшується. Через малу стійкості струменя вона розпадається на більш дрібні бульбашки газу в більшому обсязі металу.

Для футеровки фурм використовують алюмосилікатні або високоглиноземисті матеріали, що містять більше 75% глинозему.

У комплект установки входить: занурювана фурма, що складається з порожнього металевого стержня, футерованої шамотними трубками, меха-

нізм підйому і опускання фурми, піч для сушіння та зберігання занурюваних фурм і ін

Метал продувають аргоном або азотом, який надходить у фурму під тиском 0,2-0,4 МПа. При цьому забезпечується їх витрата від 20 до 120 м<sup>3</sup>/год, а в окремих випадках до 200 м<sup>3</sup>/год. Найчастіше витрата інертного газу знаходиться в межах 40-80 м<sup>3</sup>/год. У кожному конкретному випадку критерієм витрати інертного газу є поведінка сталі в ковші: не повинно бути надмірного галасу, бризок і т.д. Тривалість продувки залежить від поставленого завдання і коливається від 3 до 16 хв.

На результати обробки сталі інертними газами значний вплив надає глибина занурення фурми і її положення щодо осі ковша.

Глибина занурення фурми на ковшах різної ємності складає 2,7-4,5 м. При цьому відстань від торця фурми до днища ковша повинно знаходитися в межах 200-1200 мм. Збільшення глибини занурення фурми забезпечує більш ефективно усереднення температури і підвищення хімічної неоднорідності сталі. Однак при цьому, особливо при відсутності контролю за глибиною занурення фурми, підвищується локальний знос футеровки ковша в навколофурменій зоні.

Зсув фурми від стінки ковша на 1/3-1/2 його радіуса зменшує тривалість вирівнювання хімічного складу і температури металу.

Серед інших способів розташування занурюваних фурм слід відзначити їх установку під кутом до вертикальної осі. Похила продування за інших однакових умов забезпечує більшу ступінь диспергування газового потоку, що рівноцінно підвищенню інтенсивності перемішування.

Одним з найважливіших показників ефективності використання занурюваних фурм є їх стійкість. Середня стійкість занурюваної фурми становить 6-12 обробок. Основним чинником, що визначає тривалість служби занурюваних фурм, є стійкість їх вогнетривкої футеровки. Найбільш інтенсивно занурювана фурма зношується в зоні шлакового пояса, висота якого становить

300-500 мм. Тривалість служби занурюваних фурм можна збільшити, використовуючи для футеровки в шлакової зоні цирконієві вогнетриви.

У великих мартенівських цехах застосування даного варіанту продувки вимагає істотних капітальних вкладень для обладнання всіх сталеплавильних агрегатів припічними установками з навісними занурюваними фурмами. Крім того, ці установки складні в експлуатації, а процес технологічно недосконалий через труднощі відсічення кінцевого шлаку при випуску плавки з подових агрегатів.

Продування з використанням припічних установок здійснюють під час випуску металу в ківш або після випуску плавки. Для зменшення негативного впливу пічного шлаку, що потрапляє в ківш, продувку з метою вирівнювання хімічного складу і температури металу рекомендується закінчувати до появи шлаку або проводити після сходження пічного шлаку і нейтралізації його присадкою в ківш вапна або доломіту. Продування під час сходу пічного шлаку не допускається, так як вона може призвести до рефосфорації і підвищеному чадові вводяться в ківш легуючих елементів і розкислювачів.

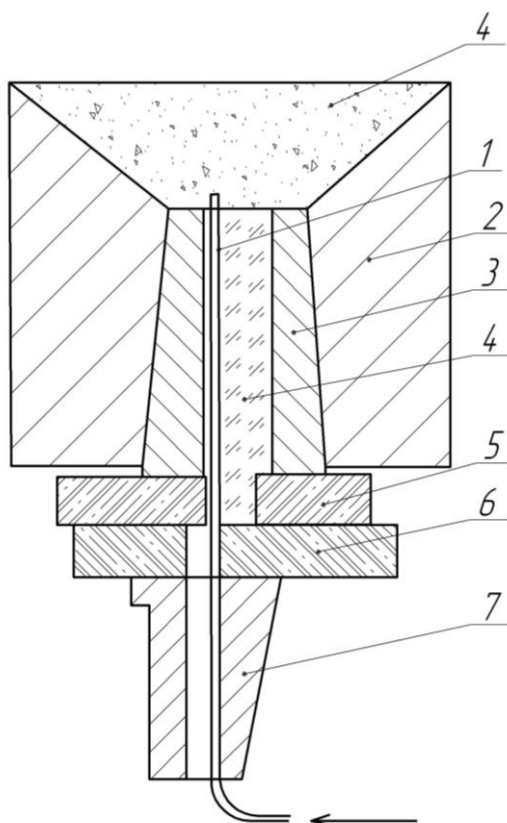
У середині 90-х років Донецьким політехнічним інститутом спільно з Макіївським металургійним комбінатом розроблено метод обробки сталі в ковші сталерозливному інертними газами з підведенням газу через спеціальну фурму, встановлену в розливному каналі шиберного затвора [3]. Фурма у вигляді порожнистої штанги, що проходить через колектор, вогнетривкі плити і розливний стакан, обладналася у верхній частині вогнетривкої пробкою з отворами, а внизу - газопідвідною трубкою. Верхня частина штанги, що розташовується в каналі розливного стакану, виконувалася масивної з невеликим лабіринтовим каналом для газу, що запобігало прохід газу по каналу штанги при припиненні подачі газу. У зоні контакту рухомою і нерухомою вогнетривких плит на штанзі була передбачена проточка, яка послаблює перетин штанги і дозволяє перерізати її при закритті шиберного затвора.

Продування металу у ковші інертним газом через шиберний затвор, на відміну від продування через занурену фурму, не вимагає спорудження спе-



ціальних установок, а пристрої, які при цьому використовуються, прості і надійні в експлуатації.

Типова схема сучасного пристосування показана на рисунку 1.1. Продувну трубку у вигляді зігнутої кисневої трубки встановлюють в отвір сталерозливного стакану і шибєрного затвора, фіксуючи її між рухомою і нерухомою плитами затвора.



1 - трубка, 2 - гніздо ковша, 3 - склянка, 4 - підсипка, 5 - верхня плита затвора, 6 - нижня плита затвора, 7 – колектор

Рисунок 1.1 – Схема продувки металу в ковші через шибєрний затвор

Продування інертним газом виконують протягом 10-20 хв. з моменту початку випуску металу і завершують при появі шлаку на жолобі мартенівської печі. На початку продувки витрату газу встановлюють на рівні 0,5-1,0 м<sup>3</sup>/хв. і поступово (у міру наповнення ковша) збільшують до 2-3 м<sup>3</sup>/хв. Тиск дугтя зазвичай становить 0,4-0,5 МПа. Витрату газу підтримують такою, щоб кипіння металу в ковші було рівномірним. Звичайна витрата газу при обробці

металу в великовантажних ковшах не перевищує  $0,1 \text{ м}^3/\text{т}$ . Перед появою шлаку рухома плита затвора при переміщенні розрізає газопідвідну трубку і подача інертного газу в ківш припиняється.

Простота, надійність і технологічність використання цього способу у великомасштабному мартенівському виробництві роблять його найбільш кращим при розробці методів комплексної обробки сталі в ковші.

## 1.2. Вибір раціонального варіанта застосування шлакоутворюючих сумішей при комплексній обробці сталі

Найбільш простим і ефективним засобом підвищення якості сталі відповідального призначення є обробка її твердими шлаковими сумішами (ТШС), які застосовуються в комплексі з продувкою металу в ковші інертними газами. Основним завданням такої обробки є додаткове зниження вмісту сірки і неметалевих включень у готовій сталі.

До твердих шлакоутворюючих сумішів та шлаків, що формуються з них, пред'являються наступні вимоги:

- висока основність, з підвищеною розкислювальною здатність елементів - розкислювачів;
- велика розкисленість шлаку в процесі обробки ( $\text{FeO} < 0,5 - 1,0 \%$ );
- висока рідинорухливість шлаку;
- достатня кількість шлаку, яке визначається необхідним ступенем рафінування по сірці і температурними умовами обробки сталі;
- забезпечення розвиненої міжфазної поверхні за рахунок емульгування шлаку при випуску металу з великої висоти і додаткового перемішування шлаку з металом інертними газами (аргоном або азотом).

Як основний компонент для приготування ТШС зазвичай використовується металургійне вапно, в якості розріджуючих компонентів - плавиковий шпат або високоглиноземисті матеріали. Витрата шлакової суміші зазвичай не перевищує  $1,0-1,5\%$  від маси металу і визначається допустимим зниженням температури металу при обробці.

На комбінаті ім.Ілліча при використанні шлакоутворюючих сумішей, що складається з 70% вапна і 30% плавикового шпату встановлено, що при витраті ТШС 0,5-1,6% від маси металу і крупності шматків суміші до 50 мм ступінь десульфурації металу в ковші становить 18,2-42,5%, брак металу по поверхневих дефектах знижується більш, ніж у 2 рази.

У киснево-конвертерному цеху комбінату «Азовсталь» ТШС використовують при виробництві сталі марки 09Г2С [4]. Суміш, що складається з вапна фракції 10-30 мм і плавикового шпату фракції до 100 мм (у співвідношенні 3:1), в кількості 1,2-6,0 кг/т разом з феросплавами присаджують в ківш протягом першої хвилини випуску, після чого метал продувають аргоном (питома витрата аргону 0,002-0,004 м<sup>3</sup>/(т·хв.) через фурму, що занурюється. Комплекс розроблених заходів дозволяє досягти середнього ступеня десульфурації металу 18-24%, тоді як на порівняльних плавках відзначена ресульфурація.

Аналогічна технологія використовується в киснево-конвертерному цеху №2 заводу «АрселоМіттал-КривийРіг». ТШС, що складається з 60-65% вапна, 20-30% високоглиноземистих відходів хімічної промисловості і 10-15% плавикового шпату, додається в процесі випуску металу з конвертера, після чого сталь продувається аргоном через занурювану фурму. Така технологія забезпечує зниження вмісту сірки в готовому металі в середньому на 37%, підвищення пластичності металу на 10-13%, збільшення виходу заготовок по групі "А" на 7,7% [5].

1.3. Основні фізичні властивості РЗМ, що визначають особливості їх поведінки при обробці сталі

При розробці науково-обґрунтованої технології мікрولهгування сталі РЗМ необхідно враховувати їх основні фізичні властивості, що визначають особливості поведінки в рідкій сталі.

Рідкоземельні метали в періодичній системі елементів Д.І.Менделєєва розташовані в побічній підгрупі третьої групи і мають порядкові номери від 57 до 71. Для цих елементів, а також ітрію (порядковий номер 39) характерні специфічна електронна структура атомів і велика схожість хімічних і фізичних властивостей [7-10]. У природі РЗМ поширені в значних кількостях [10]. Деяких з них у земній корі набагато більше, ніж таких металів, як свинець, олово, молібден і т.д. З РЗМ найбільш поширені церій, лантан і неодим.

За атомною будовою, фізико-хімічними властивостями та вмістом сирувину РЗМ прийнято ділити на дві групи: церієві, що включає лантан, церій, празеодим, неодим, прометій, самарій, європій, і ітрієву, що включає ітрій, гадоліній, тербий, діспрозій, гольмій і всі інші. Елементи церієвої групи називають легкими, а елементи ітрієвої групи - важкими.

Деякі фізико-хімічні властивості найбільш поширених РЗМ представлені нижче [11]:

Таблиця 1.1 - Фізико-хімічні властивості найбільш поширених РЗМ

Елемент	Атомний номер	Атомна маса	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Температура, °С		Теплота плавлення кДж/моль
				плавлення	кипіння	
La	57	138.92	6180	920	4516	10.0
Ce	58	140.13	6760	804	3599	9.2
Nd	60	144.27	7000	1024	3299	10.9
Y	39	88.92	4460	1552	3030	1.653

З наведених даних видно, що РЗМ мають високі температури кипіння, значно перевищуючи температури обробки сталі (1580 - 1640 °С), у зв'язку з чим для них відсутня проблема випаровування добавок, що вводяться в сталь.

Висока щільність майже всіх РЗМ, за винятком ітрію, співмірна з густиною заліза, сприяє тому, що добавки при мікролегування будуть занурюватися в розплав і, отже, у меншій мірі окислюватися і ошлаковуватися.



Температури плавлення La, Ce, Nd істотно нижче температури обробки сталі РЗМ, тому добавки цих елементів будуть в рідкому стані, що призводить до кращого засвоєння їх розплавом.

При оцінці поведінки елементів у розплаві сталі велике значення мають величини тиску пари, які спричиняють втрати елемента в результаті випаровування. Пружність парів РЗМ при температурі плавлення металів мають такі значення [10]; Па: Y – 15; Ce –  $9.5 \cdot 10^{-9}$ ; La -  $1.3 \cdot 10^{-7}$ , тобто втрати цих елементів при температурах обробки сталі внаслідок випаровування незначні.

### 1.3.1. Взаємодія РЗМ з залізом

Рідкоземельні метали завдяки схожій електронній будові характеризуються багатьма загальними властивостями, тому подвійні діаграми стану систем залізо - РЗМ також багато в чому аналогічні.

Всі системи характеризуються наявністю евтектики в області багатую рідкоземельним елементом частини діаграми стану, що знаходиться в рівновазі з  $Fe_2PZM$ . Системи утворюють до чотирьох стабільних станів наступного типу:  $Fe_{17}PZM_2$ ,  $Fe_{23}PZM_6$ ,  $Fe_3PZM$  і  $Fe_2PZM$ . Кількість сполук у системі зростає зі зменшенням радіусу атома РЗМ (нм): La - 0.187; Nd - 0.1818; Ce і Y - 0.181. Таким чином, Ce утворює з залізом дві сполуки, найбільш важкі метали - чотири. У системі Fe-La проміжних сполук не виявлено, в системі Fe-Ce:  $Fe_{17}Ce_2$  і  $Fe_2Ce$ , які утворюються по перитектичній реакції і майже не мають області гомогенності [12-14].

Таблиця 1.2 - Структурні характеристики сполук церію

Сполука	Тип структури	Періоди решітки, нм
$Fe_2Ce$	$MgCu_2$	a = 0.7302
$\alpha (Fe_{17}Ce_2)$	$Th_2Ni_{17}$	a = 0.8490
		c = 0.8281
$\beta (Fe_{17}Ce_2)$	$Th_2Zn_{17}$	a = 0.8493
		c = 1.241

Температура евтектичного перетворення становить 592 °С (при 83% (отн.) Се).

Характерною особливістю РЗМ є їх висока розчинність в рідкому залізі і низька в твердому. Так, розчинність церію в твердому залізі оцінюється від 0.1% (по масі) [13] до 0.4% (по масі) [14], коефіцієнт розподілу церію між твердою і рідкою фазами - в межах 0,01 - 0,001 [15].

Граничні значення розчинності лантану в твердому стані дуже малі і при температурі 780 °С оцінюється менше 0.1% [13].

Дослідження впливу РЗМ на термо-е.р.с заліза і залізовуглецевих сплавів [16] показало, що РЗМ знижує термо-е.р.с як заліза, так і залізовуглецевих сплавів. Це свідчить про збільшення концентрації (s + d) електронів в металі, тобто РЗМ є донорами електронів по відношенню до сталі і суттєво змінюють її атомну структуру.

Внаслідок низької розчинності у твердій фазі в процесі затвердіння сталі РЗМ можуть накопичуватися у рухомому фронті кристалізації, причому їх концентрація може бути в 100-1000 разів більше початкової. У процесі кристалізації сталі відбувається також ліквідація інших елементів, величина яких визначається коефіцієнтами розподілу домішок, отриманими на підставі оцінок граничної розчинності у твердій фазі [11]. Коефіцієнт розподілу РЗМ можна порівняти з коефіцієнтом розподілу сірки і коливається в межах 0,01-0,001.

Таким чином, утворення сульфідів і оксисульфідів РЗМ в сталі при її затвердінні буде відбуватися при дуже низьких концентраціях РЗМ в розплаві.

### 1.3.2. Взаємодія РЗМ з вуглецем

Вуглець в сталі визначає її структуру і властивості, тому представляється важливим оцінити можливість утворення сполук РЗМ з вуглецем при мікролегування сталі.

Стандартні зміни енергії Гіббса і температурні залежності констант рівноваги для реакцій утворення карбідів РЗМ, має такі значення [8, 17-19].

Таблиця 1.3 - Стандартні зміни енергії Гіббса і температурні залежності констант рівноваги для реакцій утворення карбідів РЗМ

Хімічна реакція	$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ}$ ; Дж/моль		$\lg K = A/T + B$	
	$\Delta H^{\circ}$	$\Delta S^{\circ}$	A	B
$[Ce] + 2[C] = CeC_2$	-264317	-248.34	13799	-12.964
$[La] + 2[C] = LaC_2$	-433190	-256.99	22633	-13.427
$[Nd] + 2[C] = NdC_2$	-129190	-84.98	6750	-4.440

Розрахунки показують, що значення  $\Delta G^{\circ}$  для зазначених реакцій при температурах мікролегування сталі є позитивними, що означає термодинамічну неможливість утворення карбідів РЗМ в цих умовах.

Вплив добавок РЗМ на активність вуглецю в сталі може бути оцінена за допомогою відповідних параметрів взаємодії

$$\lg f_c^{PZM} = e_c^{PZM} * [PZM]$$

де  $[PZM]$  - вміст РЗМ в сталі;

$e_c^{PZM}$  - параметри взаємодії першого порядку між вуглецем і РЗМ у розплаві.

Температурні залежності параметрів взаємодії в інтервалі температур 1300-1500 °С, за даними [19-20], мають такий вигляд:

$$e_c^{Ce} = -\frac{785}{T} + 0,396;$$

$$e_c^{La} = -\frac{709}{T} + 0.342;$$

$$e_c^{Nd} = -\frac{490}{T} + 0.238$$

Зміна коефіцієнта активності вуглецю  $f_c$  в розплаві при введенні РЗМ представлено на рис. 1.2.

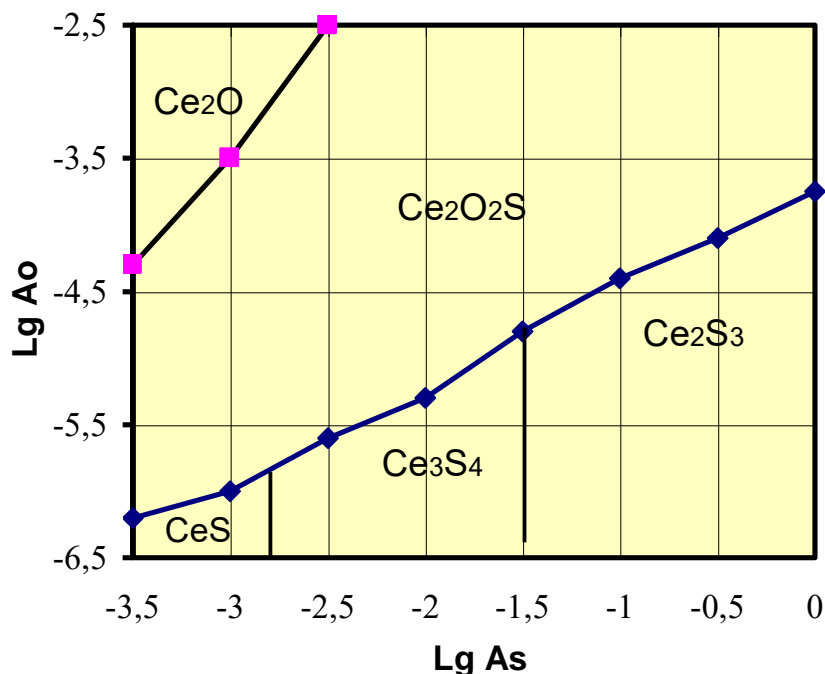


Рисунок 1.2 - Области стійкості сульфідів і оксисульфідів Се

З рисунка видно, що введення в розплав РЗМ приводить до значного зменшення активності вуглецю і зростанню його розчинності у розплаві.

Отже, РЗМ, збільшують сили зв'язку між атомами металу і вуглецю, зменшують термодинамічну активність і знижують рухливість вуглецю в металі.

### 1.3.3. Взаємодія РЗМ з киснем і сіркою

Кисень, сірка та інші домішки в кількостях, звичайно містяться в сталі, надають шкідливий вплив на її властивості, в основному в результаті впливу тих сполук, які утворюються головним чином при взаємодії з залізом [7]. Основна мета використання рідкоземельних елементів повинна складатися не тільки в тому, щоб знизити загальний вміст шкідливих домішок у сталі, а в тому, щоб зменшити ту кількість домішок, яке йде на з'єднання із залізом.

У результаті взаємодії РЗМ з киснем і сіркою можливе утворення оксидів, сульфідів і оксисульфідів [17, 21, 22].

Термодинамічні характеристики реакцій взаємодії церію і лантану з киснем і сіркою в розплаві наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Термодинамічні характеристики реакцій розкислення і десульфурації рідкого заліза церієм і лантаном

Хімічна реакція	$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ}$ , Дж/моль		$LgK = \frac{A}{T} + B$		Джерело
	$\Delta H^{\circ}$	$\Delta S^{\circ}$	A	B	
$2[Ce] + 3[O] = Ce_2O_3$	-1438511	-443.51	75040	-	[17]
$2[La] + 3[O] = La_2O_3$	-1444498	-337.30	75629	-17.65	[23]
$[Ce] + [S] = CeS$	-394698	-122.35	20600	-6.39	[24]
$[La] + [S] = LaS$	-384432	-106.85	20121	-5.59	[23]
$2[Ce] + 3[S] = Ce_2S_3$	-1032022	-340.65	53840	-17.79	[24]
$3[Ce] + 4[S] = Ce_3S_3$	-1424973	-452.10	74340	-23.59	[24]
$2[Ce] + 2[O] + [S] = Ce_2O_2S$	-1361708	-406.97	71040	-20.9	[24]
$2[La] + 2[O] + [S] = La_2O_2S$	195883	-245.2	-10217	-12.79	[19]

Зміна вільної енергії для реакції  $2 [Ce] + 2 [O] + [S] = Ce_2O_2S$  розрахована непрямим способом, шляхом комбінування реакцій утворення оксисульфїду церію з чистих речовин і розчинення церію [17], кисню [18] і сірки [18] в залізі.

Використовуючи дані таблиці 1.4, можна визначити області стійкості продуктів розкислення і десульфурації сталі і послідовність їх утворення при введенні в розплав церію і лантану.

Зміна вільної енергії для реакцій утворення  $Ce_2O_3$  і  $Ce_2O_2S$  в розрахунку на моль церію обчислювали за рівняннями ізотерм хімічної реакції Вант-Гоффа [25].

$$0.5 * \Delta G_{Ce_2O_3} = 0.5 * \Delta G_{Ce_2O_3}^{\circ} - 0.5 * RT * \ln a_{Ce}^2 * a_O^3$$

$$0.5 * \Delta G_{Ce_2O_2S} = 0.5 * \Delta G_{Ce_2O_2S}^{\circ} - 0.5 * RT * \ln a_{Ce}^2 * a_O^2 * a_S$$

де  $a_{Ce}$ ,  $a_O$ ,  $a_S$  - вихідні активності церію, кисню і сірки в розплаві.

Кордон областей стійкості  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  і  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  повинна задовольняти умові

$$\Delta G_{\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}} = \Delta G_{\text{Ce}_2\text{O}_3}$$

отже

$$\ln \frac{a_s}{a_o} = (\Delta G_{\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}}^0 - \Delta G_{\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}}^2 - \Delta G_{\text{Ce}_2\text{O}_3}^2) * \frac{1}{RT}$$

Для температури  $T = 1723 \text{ K}$  ( $1450^\circ\text{C}$ ) впливає, що  $a_s/a_o = 2,6$ .

У тому випадку, якщо відношення  $a_s/a_o$  в розплаві менше 2,6, то спочатку при введенні Се утворюється  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ . При великих значеннях термодинамічно стійким є оксисульфід  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ .

Аналогічно визначено умови кордонів областей стійкості  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  і  $\text{Ce}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  і  $\text{Ce}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  і  $\text{CeS}$ ,  $\text{Ce}_2\text{S}_3$  і  $\text{Ce}_3\text{S}_4$ ,  $\text{Ce}_3\text{S}_4$  і  $\text{CeS}$ . Отримані результати показані на рисунку 1.3.

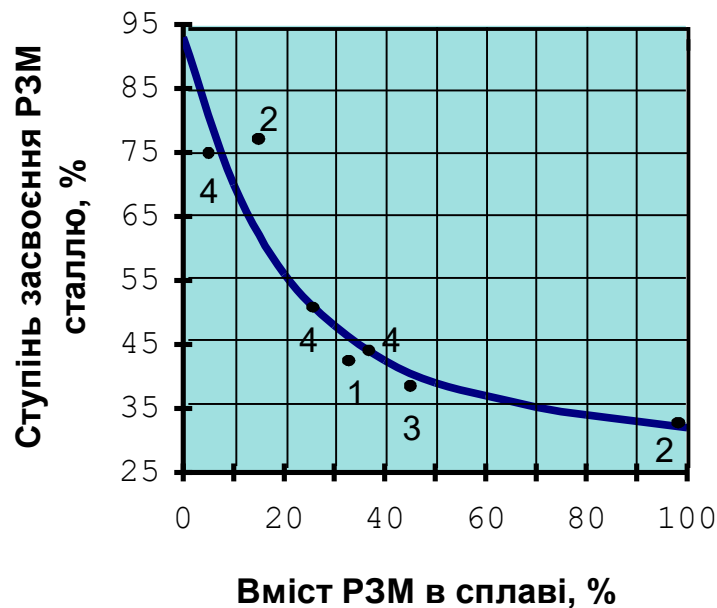


Рисунок 1.3 - Залежність ступеня засвоєння РЗМ сталлю від вмісту РЗМ у сплавах. Цифри біля точок кількість плавок

При охолодженні розплаву ймовірність утворення оксисульфідів церію підвищується, межа між  $\text{Ce}_2\text{S}_3$  і  $\text{Ce}_3\text{S}_4$  зміщується в область більш низьких

активностей сірки, тобто збільшується область термодинамічної стійкості сульфїду  $\text{Ce}_2\text{S}_3$ , утворення якого більш імовірно, ніж  $\text{CeS}$  або  $\text{Ce}_3\text{S}_4$ .

Оксисульфїди і сульфїди Ce завдяки високій хімічній спорідненості РЗМ до сірки і кисню характеризуються високою термодинамічною стійкістю в розплаві. Про це свідчать величини стандартних вільних енергій утворення сполук РЗМ. Так наприклад, при  $T = 1900 \text{ K}$  утворення рівноважних концентрацій церію і сірки в сталі за розрахунком становить  $[\text{Ce}]^2 \cdot [\text{S}]^3 = 1.5 \cdot 10^{-9}$ , що відповідає даним, отриманим експериментально [26].

Багато дослідників [27] вивчали розкислюючу здатність рідкоземельних металів, застосовуючи тонкі методи аналізу. При цьому ними були експериментально встановлені величини констант рівноваги між рідкісноземельними металами (церій, лантан) і киснем. Згідно з отриманими даними, утворення рівноважних значень  $[a_{\text{РЗМ}}]^2 \cdot [a_{\text{O}}]^3$  при  $1600^\circ\text{C}$  оцінюється величиною порядку  $10^{-19}$ , що значно перевершує розкислюючу здатність алюмінію і приблизно рівноцінна розкислювальній здібності кальцію і магнію. Десульфуюча здатність рідкоземельних металів також велика. Для  $1600^\circ\text{C}$  величина добутку  $[\text{РЗМ}]^2 \cdot [\text{S}]^3$  складає величину порядку  $10^{-10}$ , що зумовлює переважне утворення сульфїдів рідкоземельних металів.

Таким чином, термодинамічний аналіз хімічних реакцій РЗМ з сіркою і киснем показує, що при температурах обробки РЗМ попередньо розкисленої сталі і наступному її охолодженні до початку затвердіння в розплаві переважно утворюються оксисульфїди РЗМ. У міру зменшення концентрації кисню і сірки стає можливим утворення сульфїдів  $\text{Ce}_3\text{S}_4$  і  $\text{CeS}$ .

Результати термодинамічного аналізу отримали експериментальне підтвердження в роботі [28], де з використанням методики зустрічної дифузії реагентів вивчені умови утворення різних типів неметалічних включень при розкисленні церієм заліза з різним вихідним вмістом кисню і сірки. Церій на поверхню розплавів вводили у вигляді сплавів, які містять від 95 до 6% Ce.

Зразки піддали аналізу на мікрорентгеноспектральному аналізаторі Jeol 1XA-50A і растровому електронному мікроскопі Stereoscan S150.

У металі з високим вмістом кисню (0.12%) і порівняно низьким вмістом сірки (0,020%) спостерігали великі (80-150 мкм) глобулярні оксидні включення, у складі яких виявили церій і залізо. Утворення таких включень пов'язане з розшаруванням розплаву на дві рідкі фази при введенні церію. У процесі охолодження ці фази розпадаються на дрібні частинки  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  і металеву матрицю. Такі дрібні округлі оксидні включення часто спостерігаються в сталі, розкисленій РЗМ.

У зразках з однаковою концентрацією кисню і сірки (по 0.020%) в основному спостерігали оксисульфідні включення розміром 3-7 мкм.

У металі з високим вмістом сірки (0,1%) і низьким вмістом кисню (0,020%) основну масу включень становили великі глобулярні сульфідні частинки розміром 35-60 мкм і більш дрібні оксисульфідні включення.

Утворення неметалічних включень при мікролегуванні РЗМ низькосірчистої сталі розглянуто в роботі [29].

Дослідження проведено при виплавці сталі 12Х1МФ в 6-т індукційній печі з чистих шихтових матеріалів і в промислових умовах.

Мікродобавки РЗМ вводили у вигляді мішметала з вмістом 60-80% Се. Вміст РЗМ в сталі був в межах 0,014-0,070%.

Неметалічні включення досліджували на світловому мікроскопі з приставкою для мікроаналізу.

Встановлено, що при мікролегуванні сталі з вмістом сірки 0,004-0,005% утворюються оксидні включення  $\text{CeO}_2$ , причому збільшення вмісту РЗМ більше 0,04% призводить до зменшення розміру включень до 0,2-1,25 мкм в порівнянні з включеннями розміром 2,8 - 4,6 мкм в сталі з 0,015% РЗМ.

При вмісті в промисловій сталі 0,009-0,012% сірки в сталі спостерігалися сульфідні церію  $\text{Ce}_2\text{S}_3$  і оксид  $\text{CeO}_2$ .

Як правило, всі виявлені включення мали глобулярну форму або округлу, іноді злегка довгасту форму і були досить рівномірно розподілені в об'ємі металу.



У мікролегованій РЗМ сталі відсутні сульфід марганцю MnS і строчки цих сульфідів, що спостерігаються в металі без мікродобавки.

Явище повного перетворення сульфідів марганцю в глобулярні сульфід РЗМ відзначено і в роботі [30], де встановлено, що це настає при відношенні змісту РЗМ до змісту сірки, який дорівнює або перевищує 1,5-3.

На підставі термодинамічного аналізу можна виконувати стехіометричні розрахунки протікання хімічних реакцій і розрахувати кількість церію, необхідного для зв'язування кисню і сірки. Вважаючи, що весь кисень пов'язаний в  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$ , а вся сірка пов'язана в оксисульфіді і сульфіді, для практичних розрахунків може бути використано рівняння:

$$[\text{Ce}] = \frac{2 \cdot 140}{3 \cdot 32} \cdot ([\text{S}] + 2[\text{O}]) = 2.92 \cdot ([\text{S}] + 2[\text{O}])$$

У тому випадку, якщо обробці піддається сталь з низьким вмістом кисню і сірки, необхідну кількість церію можна визначити, припускаючи, що в основному утворюються сульфід типу CeS і оксисульфід  $\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$  за рівнянням

$$[\text{Ce}] = 4,37 \cdot ([\text{S}] + [\text{O}])$$

#### 1.3.4. Взаємодія РЗМ з фосфором

РЗМ володіють високою спорідненістю до фосфору і дію РЗМ, що зв'язують фосфор у неметалеві включення, еквівалентно очищення сталі від фосфору і запобіганні утворення сегрегації в  $\gamma$ -фазі [31].

Так, присадка La в хромонікелеву сталь, що містить 0,044-0,048% фосфору, зменшує концентрацію фосфору на межах зерен, в результаті чого критична температура переходу сталі в крихкий стан знижується на 70°C [32].

### 1.3.5. Фізичні властивості і структура сполук РЗМ

Щільність, температура плавлення і параметри кристалічних решіток основних з'єднань РЗМ, що зустрічаються в сталі, представлені в таблиці 1.5 [7, 8, 10, 11, 12, 33].

Таблиця 1.5 - Деякі фізико-хімічні та фізичні властивості сполук РЗМ

Сполука	Множення активностей		Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Температура плавлення, °С	Кристалічна решітка	Параметри решітки	
	Формула	Значення при 1990 К				a	b
CeO <sub>2</sub>	$a_{\text{Ce}}^2 * a_{\text{O}}^2$	4.0*10 <sup>-11</sup>	7220	1950	КГЦ	5.411	–
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$a_{\text{Ce}}^2 * a_{\text{O}}^3$	3.0*10 <sup>-11</sup>	6670	1690	К	11.126	–
CeS	$a_{\text{Ce}} * a_{\text{S}}$	4.8*10 <sup>-6</sup>	5980	2450	КГЦ	5.766	–
Ce <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	$a_{\text{Ce}}^2 * a_{\text{S}}^3$	4.0*10 <sup>-3</sup>	5250	1890	КОЦ	8.6176	–
Ce <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S	$a_{\text{Ce}}^2 * a_{\text{O}}^2 * a_{\text{S}}$	1.3*10 <sup>-20</sup>	6000	1949	Гексогональна	4.004	6.8
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$a_{\text{La}}^2 * a_{\text{O}}^3$	8.4*10 <sup>-23</sup>	6560	2250	Гексогональна	3.934	6.1
LaS	$a_{\text{La}} * a_{\text{S}}$	1.0*10 <sup>-6</sup>	5850	1871	КГЦ	5.842	–
La <sub>2</sub> S		–	4980	2099	КОЦ	8.706	–
La <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S	$a_{\text{La}}^2 * a_{\text{O}}^2 * a_{\text{S}}$	7.3*10 <sup>-22</sup>	5800	1993	Гексогональна	4.020	6.9

Продукти взаємодії РЗМ з киснем і сіркою в чистому вигляді мають високу температуру плавлення і це дозволяє припустити, що вони виділяються в твердому стані. Однак проти цього говорить той факт, що в зоні злитка з підвищеним вмістом сірки і РЗМ спостерігаються великі округлі або близькі до них за формою включення оксисульфідів і сульфідів РЗМ, що розташовуються між дендритів.

У той же час при гарячій прокатці включення РЗМ не розм'якшуються, не пластичні і не витягуються, а дробляться або взагалі не деформуються.

Уточнити це питання дозволяє вивчення механізму утворення включень РЗМ та їх трансформації при наступному охолодженні і нагріванні, розглянутий у роботах [34, 35].

З наведених даних таблиці 1.5 випливає, що оксиди і, особливо, сульфід РЗМ за типом і параметрами кристалічних ґраток є ізоморфними по відношенню до ґрат заліза ( $\delta$  і  $\gamma$ ). Тому, мікролегування сталі РЗМ викликає розшарування розплаву на дві рідкі фази: продукти розкислення і десульфурації РЗМ, які мають у своєму складі значну кількість заліза, і метал з низьким вмістом кисню і РЗМ. Кошти, виділені з першої рідкої фази великі глобулярні включення при певних умовах розпадаються за монотектичною реакцією на металеву матрицю і тверді включення типу оксидів, оксисульфідів і сульфідів РЗМ.

Розпад великих глобулярних включень залежить від швидкості охолодження і є оборотним, тобто при повторному нагріванні дрібні неметалеві включення з РЗМ знову трансформуються у великі рідкі глобулі.

Тому при охолодженні розплаву зі швидкістю  $350^\circ\text{C}/\text{сек}$  в металі виявлені тільки великі глобулярні включення, що містять, як показав мікрорентгеноспектральний аналіз, залізо, кисень, сірку і РЗМ; зі зменшенням швидкості охолодження до  $100^\circ\text{C}/\text{сек}$  зовнішній вигляд глобулів змінюється; починається їх розпад на металеву матрицю і чисті включення РЗМ; при охолодженні зі швидкістю  $1^\circ\text{C}/\text{сек}$  глобулі повністю розпадаються на розкислений метал і чисті включення РЗМ, які присутні у вигляді дуже дрібних ( $<2$  мкм) хаотично розташованих включень.

Специфічну поведінку продуктів обробки сталі РЗМ робить істотний негативний вплив на в'язкісні властивості сталі.

Вплив невеликих добавок РЗМ на в'язкісні властивості електролітичного заліза з вмістом  $0,08\%$  кисню і сталі марки 40Х розглянуто в роботі [36]. При введенні РЗМ в кількості  $0,05\%$  від маси заліза спостерігалось різке підвищення в'язкості металу, яке при подальшій витримці практично не змінювалось. Встановлено, що церій, що має велику спорідненість до кисню й сірці, утворює глобулярні включення складного складу, щільність яких близька до щільності рідкого заліза.

#### 1.4. Вплив способу введення, складу і виду добавок на засвоєння РЗМ

Величина засвоєння хімічно активних елементів значною мірою визначається способом їх введення в рідкий метал і видом добавки.

Відомі способи введення мікродобавок в рідкий метал умовно поділяються на три групи: у сталеплавильний агрегат, в сталерозливний ківш і в центрову або виливницю [37].

Присадка хімічно активних елементів в сталеплавильний агрегат зазвичай приречена на невдачу, оскільки вони окислюються шлаком, киснем повітря при випуску і розливанні, футеровкою агрегату і сталерозливного ковша, тому перед присадкою таких елементів у сталеплавильний агрегат проводять попередню підготовку металу і шлаку: глибоко розкислюють метал сильними розкислювачами, в дуговій печі з основною футеровкою наводять відновлювальний шлак. Мікродобавки в рідкий метал занурюють примусово. РЗМ і комплексні сплави на їх основі вводять в глиб металу на сталевих прутках або поміщають у дзвони, металеві коробки, а також обертають бляхою або укладають в оболонку з розкислювача [38].

Щоб уникнути великого чаду, присадка мікродобавок хімічно активних елементів в сталеплавильний агрегат використовується на агрегатах малої місткості (лабораторні індукційні печі та ін.), в вакуумних індукційних печах, на плавильних агрегатах із захисною атмосферою [39].

Найбільш простий спосіб - введення мікродобавок в сталерозливний ківш під струмінь металу після присадки всіх розкислювачів. Спосіб застосовується досить часто, однак, при його використанні важко домогтися високого і стабільного засвоєння хімічно активних елементів внаслідок окислення їх киснем металу і повітря, шлаком і футеровкою сталерозливного ковша. Зазвичай засвоєння РЗМ при присадці їх у сталерозливний ківш під струмінь металу становить 10-30% і лише на окремих плавках досягає 50% [40,41]. За час витримки металу в сталерозливному ковші і розливання сталі вміст введених елементів продовжує зменшуватися, тому спостерігається суттєва від-

мінність у вмісті РЗМ у злитках, відлитих першими й останніми. Так, при введенні сілікомішметала, що містить 30% РЗМ, в сталерозливний ківш з шамотною футеровкою під струмінь металу, протягом випуску (3-5 хв.) окислюється 50% введеного РЗМ, а в процесі витримки металу в сталерозливному ковші і розливання (50 - 60 хв.) вміст РЗМ зменшується ще на половину [42].

Від інтенсивного окислення мікродобавки, що містять РЗМ, оберігають загортанням в залізну фольгу, сталевий лист, проте ці заходи малоефективні при мікролегуванні великих обсягів сталі.

При глибокому розкисленні металу в сталерозливному агрегаті сплави з РЗМ можуть бути введені на дно сталерозливного ковша перед випуском плавки в жерстяних коробках, барабанах, у листових пакетах, обважнених скрапів з засипкою флюсом, сталевою січкою, стружкою. Відомий також спосіб "сендвіч", при якому хімічно активні елементи закладають в поглиблення в футеровці дна сталерозливного ковша і закривають зверху скрапом та флюсом.

Запропоновано спосіб введення РЗМ в сталерозливний ківш з рідкою сталлю у вигляді циліндричних втулок, отриманих пресуванням з порошку РЗМ, перемішених з порошком алюмінію, заліза та іншими компонентами. Пресовані втулки закріплюють на стопорі сталерозливного ковша поверх вогнетривких трубок, причому нижній край втулок знаходиться поблизу від днища сталерозливного ковша. Для тривалого зберігання втулки рекомендується покривати алюмінієм, міддю або сталлю [43].

Випробувано введення в рейкову і нестаріючу сталь 08Ю фероцерію у вигляді брикету і моноліту в оболонці з алюмінію. РЗМ при такому введенні починає реагувати з компонентами сталі після розчинення алюмінію, який є фізико-хімічним захистом від передчасного чаду [44].

Механізм утворення включень РЗМ і можливість утворення оксисульфідів РЗМ при введенні в рідку сталь, попередньо розкисленій алюмінієм і без попереднього розкислення, мішметала, Si-Ce, Ca-Si-Ce розглянуто в ро-

боті [45]. Встановлено, що найбільш високе засвоєння РЗМ та підвищення механічних властивостей сталі марки 52С досягаються при введенні комплексного сплаву Ca-Si-Сe у попередньо розкислену сталь.

Одночасне введення в корозійностійку сталь (25% Cr, 25% Ni) алюмінію і РЗМ у кількості 1,0-1,25 кг/т забезпечує, як встановлено в роботі [46], зниження вмісту кисню на 40%, вмісту сірки - до 0,004%.

Ще більш ефективно введення РЗМ у складі комплексного сплаву з алюмінієм [47-49].

Так, при мікролегування сталі марок 20ГСА і 15Х1М1ФА сплавом СИИТМИШ, що містить, %: Al - 15; Si - 49; (Y + РЗМ) - 32 і Fe - реш. в кількості 0,2% отримано різке зменшення неметалічних включень з формою, близькою до сферичної, що підвищило пластичність металу і знизило схильність сталі до утворення гарячих тріщинах [47].

Істотне підвищення фізико-хімічних властивостей литої сталі, особливо її міцності, забезпечує комплексний сплав, який містить, %: Al - 15-45; Ti - 1-15; Mg - 0.2-10; V - 1-10; РЗМ - 1 - 15; Mn - 20-70; Fe - 5-55; C - 0.1-3; S - 0,001-0,03; P - 0,001-0,03 [48]. А застосування сплаву, що містить, %: F1 - 40-80; Ca - 5-30; Ti - 5-20; РЗМ - 2-35; Fe - реш., забезпечує підвищення фізико-хімічних властивостей сталі при засвоєнні сплаву на 85 - 90% [49].

Підвищити стабільність і ступінь засвоєння РЗМ можна шляхом присадки в сталерозливний ківш мікродобавок певного гранулометричного складу. У роботі [44] встановлено, що оптимальний поперечний розмір шматків сплавів на основі кремнію може бути визначений з емпіричної залежності:

$$d = K * M$$

де  $d$  - поперечний розмір шматків сплаву, мм;

$K$  - коефіцієнт, що дорівнює  $K = 2$  для ковшів місткістю до 10 т,  $K = 1$  для ковшів ємністю 50 т,  $K = 0,7$  для ковшів ємністю 100 т і  $K = 0,3$  для ковшів місткістю понад 100 т;

$M$  - місткість ковша, т.

Цілий напрям в сучасній металургії якісної сталі отримала інжекційна металургія. У світі вже діє понад 100 установок типу ТН, що дозволяють у промислових умовах обробляти метал порошками в сталерозливних ковшах місткістю 35-300 т. Тривалість продувки становить 3-20 хв., стійкість футерованої фурми 30-50 плавок, глибина занурення фурми 2-3 м. Така фурма може бути занурена на будь-яку глибину без побоювання пошкодити футеровку днища сталерозливного ковша. Продування порошками здійснюють в струмені аргону, рідше - азоту при тиску газу 0.3-0.6 МПа і швидкості вдування порошку 12-20 кг / хв. [50].

Поряд з кальцієм, магнієм і ін. реагентами випробувані порошкоподібні суміші, що містять РЗМ з кремнієм. Встановлено, що метод рафінування та мікролегування сталі шляхом введення порошкоподібних реагентів з РЗМ дозволяє досить ефективно підвищити якість сталі: поліпшити макроструктуру злитків і заготівель, раціонально змінити склад і морфологію неметалевих включень, зменшити їх розміри, підвищити ізотропність, а також пластичні властивості та ударну в'язкість сталі, знизити її чутливість до окрихчування в воденьвмісних середовищах, поліпшити зварюваність сталі.

Недоліком інжекційної металургії є потреба в спеціалізованих дільницях і обладнанні для підготовки, транспортування і введення порошкоподібних реагентів у вибухо- і пожежобезпечному виконанні, підвищення вмісту водню в сталі.

Значно простіше введення різних реагентів в металевий розплав за допомогою вихрової воронки з тангенціальним підведенням металу [51,52].

Вихровий потік в цих пристроях створюється без додаткових витрат енергії завдяки використанню кінетичної енергії струменя, що впливає з плавильного агрегату, при переливах з ковша в ківш, при заливці металу у виливниці або кристалізаторі. Тверді добавки надходять з бункера самопливом або за допомогою дозуючих пристроїв. При наявності нижньої реакційної камери підвищується ступінь обробки розплаву в результаті додаткового перемішування реагують фаз, забезпечується можливість відокремлювати

шлак від металу. Важливою перевагою вихрових змішувачів є можливість обробляти розплав в дискретному і безперервному потоках [53]. Однак, і в цей варіант мікролегування сталі не усуває основні недоліки застосування хімічно активних елементів у вигляді порошку.

Особливий інтерес представляє введення мікролегуючих елементів, поміщених в захисну оболонку (спосіб WF). Отримано десятки патентів на способи отримання лігатури у вигляді дроту або стрічки, способи введення їх в рідкий метал. При цьому, як правило, серцевина дроту складається з хімічно активних елементів або їх сплавів, а оболонка з відносно інертного до сталі матеріалу. Розміри частинок порошкоподібних матеріалів ядра дроту від декількох мікрон до 1 мм, зазвичай 0,2-0,5 мм, товщина стрічки, що йде на виготовлення оболонки, 0,1-2,5 мм. Композиційна дрот має діаметр 4-20 мм (частіше 4-11 мм). Відомий і композиційний дрот з мішметалу або фероцерію в оболонці зі сталі.

Розроблені та застосовуються ряд методів введення композиційного дроту в розплав: у сталерозливний ківш з допомогою спеціальних механізмів по направляючій трубці зі швидкістю до 300 м/с, в проміжний ківш МБЛЗ, в кристалізатор МБЛЗ, в центрову по ходу розливання сталі сифонним способом і виливницю при розливанні сталі зверху.

Випускається спеціальне обладнання для прошовування в рідкий метал дроту круглого перерізу діаметром від 3 до 10 мм, а також квадратного і багатогранного перетину в заданих режимах [54].

Розроблено спосіб присадки мікродобавок в рідкий метал у вигляді дроту з оболонкою з поліетилену, який випаровується при контакті з рідким металом.

Недоліками способу WF є: потреба в спеціалізованих ділянках з виготовлення та введення порошкового дроту, значні витрати на обробку, що робить його неприйнятним в масовому виробництві. Необхідно також врахувати високу токсичність порошків РЗМ [55].



Простіші способи мікролегування сталі сплавами з РЗМ, тобто введення їх під струмінь металу у процесі випуску плавки після присадки всіх феросплавів часто не призводить до бажаного результату.

Так, на комбінаті ім. Ілліча при освоєнні виробництва конвертерної сталі марок 17Г2АФ і 08Г2МФБ на ряді плавок було випробувано їх мікролегування у процесі випуску сплавів СІИТМІШ [56]. Було встановлено, що при введенні в метал сплаву з РЗМ (2-3 кг / т) істотно зменшується чад Mn і Al і досягається додаткова десульфурація металу (вміст сірки знижується на 0,001-0,002%) зі стабільним отриманням вмісту сірки в готовій сталі, проте розливання металу досвідчених плавок було ускладнено у зв'язку з інтенсивним затягуванням каналу сталерозливного стакану.

Позбутися від цього недоліку, як встановлено в роботах [57-59] можна шляхом використання РЗМ в комплексі з кальцієм.

У роботі [57] встановлено, що при обробці металу порошкоподібним кальцієм і РЗМ вміст сірки знижується з 0,040-0,018 до 0,025-0,012% при ступені десульфурації 46,5%. При цьому істотно підвищуються розливання і службові властивості металу, особливо призначеного для виробів, експлуатація яких здійснюється при низькій температурі.

У роботі [58] було встановлено, що легування сталі марки 45ФЛ одним ванадієм не забезпечує виконання вимог до опору руйнування литих деталей ходової системи тракторів, і в якості додаткового резерву підвищення морозостійкості було використано модифікування сталі кальцієм і церієм. Встановлено що найкращий комплекс властивостей забезпечується при витраті силікокальцію і фероцерію по 1.0 кг / т сталі кожного. Для сталей 45ФЛ отримано:  $\sigma_T = 450$  МПа,  $\sigma_B = 745$  МПа,  $\delta = 16,0$  %,  $\phi = 29$  %,  $KCU^{+20} = 52$  Дж/см<sup>2</sup>,  $KCU^{-40} = 32$  Дж/см<sup>2</sup>.

Введення РЗМ спільно з кальцієм або титаном забезпечує не тільки сфероїдизацію неметалічних включень, а й рівномірний розподіл їх у сталі [59]. Запропоновано показник форми включень П, що утворюються в сталі при введенні кальцію і РЗМ і характеризується відношенням вмістів кальцію

і РЗМ до вмісту сірки. Встановлено, що при малих добавках кальцію і РЗМ ( $P \leq 0.2$ ) їх введення призводить до глобуляризації сульфідів. Процес сфероїдизації включень починається при  $P > 0,4$  і настає в усьому обсязі злитка при  $P = 1,8$ . Отримані співвідношення знайшли гарне підтвердження при виробництві високоміцних трубних сталей класу міцності Х42-Х65. Встановлено також, що при  $P \geq 1,8$  сталь зовсім не чутлива до водневого розтріскування.

Високий чад хімічно активних елементів змушує шукати способи їх введення, максимально наближаються за часом до моменту кристалізації сталі.

Особливо часто при сифонному розливанні сталі використовується мікролегування металу в центрову.

У роботі [60] гранули подрібнені до 5-20 мм лігатури вводили в центрову з бункера. Швидкість введення регулювали набором колекторів. Встановлено, що висока турбулентність потоку рідкої сталі прискорює розчинення лігатури, підвищує ефективність масообмінних процесів, а які утворюються великі неметалеві включення виносяться циркуляційними потоками на поверхню металу в виливницях та асимілюються шлаком. Підкреслюється, що метод дозволяє здійснити часткове рафінування сталі від шкідливих домішок і неметалевих включень і пізніше мікролегування сталі.

На комбінаті «АрселорМіттал-КривийРіг» розроблені та впроваджені спеціальні установки для мікролегування сталі лігатурою РЗМ в процесі сифонного розливання у виливниці. Установка складається з бункера-наповнювача, видаткового бункера, роторного живильника, ходового візка з поворотною рамою, віброжолоба, повішеного на поворотній рамі через пружні підвіски, віброзбуджувача, механізму нахилу жолоба і системи керування електроприводами. Вважається найбільш раціональним вводити РЗМ у складі комплексних сплавів в невеликих кількостях і в дрібному вигляді [61].

Майже така ж технологія розроблена для мікролегування сталі сплавом СЦЕМИШ-2 в роботі [62].

Порівняння ефективності присадки фероцерію в сталерозливний ківш і виливниці наведено в роботі [63]. Досвідчені плавки з мікролегуванням сталі

марки 60 церієм проведені в 600-т мартенівських печах. Фероцерій (95-98% церію) сідав двома способами: в сталерозливний ківш у кількості 0,5; 0,75 і 1,0 кг/т сталі і в виливниці - 1,0, 1,5 і 2,0 кг/т.

Встановлено, що ефективність присадки фероцерію у виливницю з розрахунку 1,0 кг/т сталі істотно вище, ніж аналогічна присадка в сталерозливний ківш. Поліпшується макроструктура злитку, послаблюється зональна ліквідація по перетину злитка сірки, фосфору та вуглецю, забрудненість сталі неметалевими включеннями, що зрушує поріг холодноламкості з +20 до -40 °С. Однак збільшення витрати фероцерію у виливницю до 1,5-2,0 кг/т призводить до появи в поверхневих шарах заготовок мікропороків, які не видаляються при подальших переділах.

Аналогічні результати отримані при мікролегування сталі РЗМ по ходу розливання і в дослідно-промислових умовах [64]. У роботі встановлено, що мікролегування розкисленої алюмінієм сталі РЗМ у центрові забезпечує модифікування неметалевих включень і підвищення якості прокату при високому рівні засвоєння РЗМ. Однак, при вмісті РЗМ в сталі більше 0,02% виникає дефект мікроструктури металопродукції - церієва неоднорідність. Зроблено висновок, що мікродобавки РЗМ слід вводити в виливниці для модифікування спокійних сталей всього сортаменту з отриманням вмісту церію в металі не більше 0,02%. Введення РЗМ у великих кількостях можливе при низькому вмісті сірки в металі для прокату малих товщин.

Інститутом Чорної Металургії і комбінатом «АрселорМіттал-КривийРіг» виконаний комплекс досліджень з відпрацювання раціональної технології мікролегування сталі масового призначення РЗМ церієвої групи в виливницях [65]. Досліди проведені на маловуглецевій спокійній сталі, що виплавляється в мартенівських печах, ДСПА і конвертерах. Досліджено такі варіанти введення РЗМ у вигляді сплаву ФС30РЗМ30 в сталь: центрову по ходу розливання металу сифонним способом, у виливниці в процесі розливання металу зверху і сифонним способом. У процесі розливання металу сифоном дрібнопорізану (до фракції 0-15 мм) лігатуру додають в центрову з

бункера за спеціальним жолобом, або у виливниці в жерстяних трубах діаметром 80-90 мм і довжиною 2500 мм, а при розливанні зверху - під струмінь металу (з ковша) у пакетах.

Вплив технології введення і витрати лігатури на ступінь засвоєння РЗМ і хімічну неоднорідність заготівлі показано в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Засвоєння РЗМ і хімічна неоднорідність заготовок при різних варіантах мікролегування сталі РЗМ у виливницях

Спосіб розливання сталі	Режим введення лігатури	Витрата сплаву, кг / т	Ступінь засвоєння РЗМ	Вміст елементів, %		Коефіцієнт варіації елементів	
				сірка	РЗМ	сірка	РЗМ
Сифоном	У центрову по ходу наповнення виливниць	1	32	0.023	0.011	12.8	27.0
		2	32	0.025	0.022	15.1	26.2
		3	48	0.030	0.049	30.5	40.8
		4	59	0.024	0.060	49.0	51.1
		5	52	0.025	0.089	86.2	63.8
Сифоном	У центрову по ходу наповнення нижньої частині виливниці	3	41	0.028	0.042	26.1	31.8
Сифоном	В жерстяних трубах	4.5	33	0.020	0.047	25.3	45.4
		5.5	34	0.020	0.061	27.5	44.4
		6.5	29	0.019	0.062	30.4	47.4
Зверху	По ходу наповнення виливниць	3	31	0.018	0.044	41.0	43.1
		5	28	0.013	0.066	56.5	49.3
		7	26	0.015	0.085	84.1	60.9

З таблиці 1.6 видно, що збільшення витрати лігатури в центрову з 1 до 3 кг/т супроводжується істотним збільшенням засвоєння РЗМ сталлю. При цьому при витраті лігатури до 2 кг/т характер розподілу сірки і РЗМ по перерізу і довжині розкату, такий же, як і інших елементів. При витраті лігатури 3 кг/т і вмісті РЗМ в сталі 0,042-0,051% виникає особливий характер розподілу РЗМ і сірки в злитках, причому з подальшим збільшенням витрати лігатури хімічно-неоднорідність заготівлі збільшується.

На дослідно-промисловій партії плавок з мікролегуванням РЗМ, що передбачає механізоване введення сплаву ФС30РЗМ30 з фракцією шматків від

2 до 9 мм у центрову, підтвердилося, що вміст РЗМ в металі 0,03% і більше призводить до появи церієвої неоднорідності прокату.

Перелік способів введення РЗМ у виливниці на кінець 80-х років при виробництві електросталі наведені в роботі [66]. До них відносяться: введення на дно виливниці до початку розливання; присадка лігатури шматками при наповненні виливниць сифоном або зверху на одну третину висоти; введення лігатури в мішечках під струмінь металу, починаючи від надходження сталі в виливницю до наповнення її на  $2/3$  висоти; вдування в струмінь металу у вигляді комплексного сплаву або в суміші з іншими розкислювачами; введення у вигляді шматочків або дроту пострілом; занурення на штангах після наповнення виливниць; присадка в прибуткову надставку відразу після наповнення виливниці.

Для захисту від передчасного окислення лігатури оберігають папером, просоченим оксидами титану, картонними гільзами, тонкостінними сталевими й алюмінієвими оболонками.

Вдування в струмінь розплавленого металу багатокомпонентних порошкоподібних сумішей, зокрема з мішметала, забезпечує засвоєння церію приблизно на 30% [67].

При введенні лігатури у вигляді дроту, сердечник якої складається з пресованих порошків РЗМ, кальцію, алюмінію та ін, укладених в оболонку з металу, що слабо реагує з лігатурами при високій температурі (Fe, Cu, Ni, їх сплави), в центрову при сифонному розливанні сталі досягається досить високе засвоєння РЗМ при рівномірному розподілі легуючих в обсязі злитку [68]. Однак, трудомісткість методу та екологічна небезпека роботи з порошком РЗМ робить його неприйнятним в крупномасштабному виробництві.

Дуже високе (70-95%) та стабільне засвоєння РЗМ забезпечують методи, запропоновані в роботах [69-71].

Засвоєння РЗМ 70-90% забезпечується при його введенні у виливниці у вигляді гранул розміром 20-15 мм у складі екзотермічних шлакоутворюючих сумішей і брикетів, що застосовуються при розливанні сталі [69]. Досягнуте

зменшення забрудненості сталі неметалевими включеннями дозволяє підвищити її ударну в'язкість на 40-45%.

Дуже високе (87%) та стабільне засвоєння РЗМ забезпечується при сифонному розливанні сталі у виливниці, попередньо заповнені аргоном, якщо РЗМ поміщені в ці виливниці в тонкостінних трубах [70]. Сталь при цьому мінімально забруднюється неметалевими включеннями, але відмічено значне скупчення неметалічних включень у зоні "конуса осадження" злитка.

Засвоєння РЗМ 75-95% забезпечується при введенні його по ходу розливання у вигляді металевих гранул, ядро яких складається з РЗМ, а на поверхні знаходяться компоненти, що утворюють легкоплавкий шлак. Разом з тим, введення шлакометалевих гранул порушує технологічний режим розливання у зв'язку із затягуванням сталерозливних стаканів, погіршує якість поверхні злитків [71].

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ, ТВЕРДИМИ ШЛАКОВИМИ СУМІШАМИ І ЛІГАТУРАМИ З РЗМ

### 2.1. Дослідження впливу продувки металу інертним газом на масообмінні процеси в великовантажному сталерозливному ковші

При визначенні ефективності застосування продувки металу в сталерозливному ковші інертними газами слід порівняти потужності, передані падаючим струменем металу і бульбашками інертного газу, що піднімаються в металі.

Потужність падаючого струменя металу ( $N_{стр}$ , кВт) може бути визначена за рівнянням

$$N_{стр} = (2 * M / t) * (1 - \tau / t) * q * \left( L + l - \frac{8 * M * \tau (1 - \tau / 2 * t)}{\pi * D^2 * \rho_{Me} * t} \right) * 10^{-3} \quad (2.1)$$

де  $M$  - повна маса злитого в ківш металу, кг;

$t$  - тривалість зливу металу в ківш, с;

$\tau$  - поточне значення часу, с;

$q$  - прискорення сили тяжіння, рівне  $9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$L$  - висота ковша, м;

$l$  - відстань від кромки зливного жолоба до ковша, м;

$D$  - діаметр ковша, м;

$\rho_{Me}$  - щільність рідкого металу, що дорівнює  $7200 \text{ кг/м}^3$ .

Варіант продувки металу в ковші інертним газом з використанням кисневої трубки, що проходить через шиберний затвор передбачає витрату інертного газу від  $0,5$  до  $3 \text{ м}^3/\text{хв}$ . Продування здійснюється через днище сталерозливного ковша з моменту початку випуску металу до появи шлаку на жолобі мартенівської печі. При цьому, як встановлено моделюванням процесу, гетерогенний вертикальний струмінь, що складається з спливаючих бульба-

шок газу і увлекаемого ними металу, розкривається на кут  $20^\circ$ . В області підпору струменя спливаючі газові бульбашки переходять в атмосферу, а вертикальний потік металу відхиляється в горизонтальному напрямку. У стінок ковша радіальний поверхневий потік знову змінює напрямок і вливається у вертикальний низхідний потік. Далі лінії струму зливаються в кільцевій циркуляційний контур.

При продувці рідини газом потужність ( $N_g$ , кВт), передана металу бульбашками, що піднімаються, складається з потужності ізотермічного розширення при нагріві його від температури на виході з кисневої трубки ( $T_o$ ) до температури металу ( $T_b$ ), виштовхуючих сил і ізотермічного розширення газу в процесі підйому міхура від зрізу кисневої трубки при тиску стовпа металу ( $P_b$ ) до атмосферного ( $P_a$ ).

$$N_i = M_i \cdot R \cdot T_{\%o} \left[ \left( 1 - T_{\%o} / T_{\%o} \right) + 2 \cdot \ln \left( \frac{T_{\%o}}{T_{\%e}} \right) \right] \cdot 10^{-3} \quad (2.2)$$

де  $M_g$  - масова витрата інертного газу, кг / с;

$R$  - газова постійна при  $T = 273$  К, Дж / (кг \* град);

Порівняння потужностей  $N_{стр}$  і  $N_g$ , виконане з урахуванням умов мартенівського цеху Запоріжсталь ( $M = 300000$  кг;  $t = 8-16$  хв.;  $L = 4,75$  м;  $l = 1$  м;  $D = 3,5$  м;  $T_o = 300$  К;  $T_b = 1900$  К;  $P_a = 0,1$  МПа;  $R_{ar} = 208$  Дж/(кг\*град);  $R_{N2} = 298$  Дж/(кг\*град);  $V_g = 20-40$  м<sup>3</sup>/плавку), наведено на рисунку 2.1.

З рис. 2.1 видно, що в умовах випуску металу в 300-т ківш з продуванням інертним газом через шибєрний затвор головну роль в перемішуванні розплаву спочатку випуску відіграє робота падаючого струменя металу, а в кінці випуску - робота бульбашок інертного газу, що піднімаються.



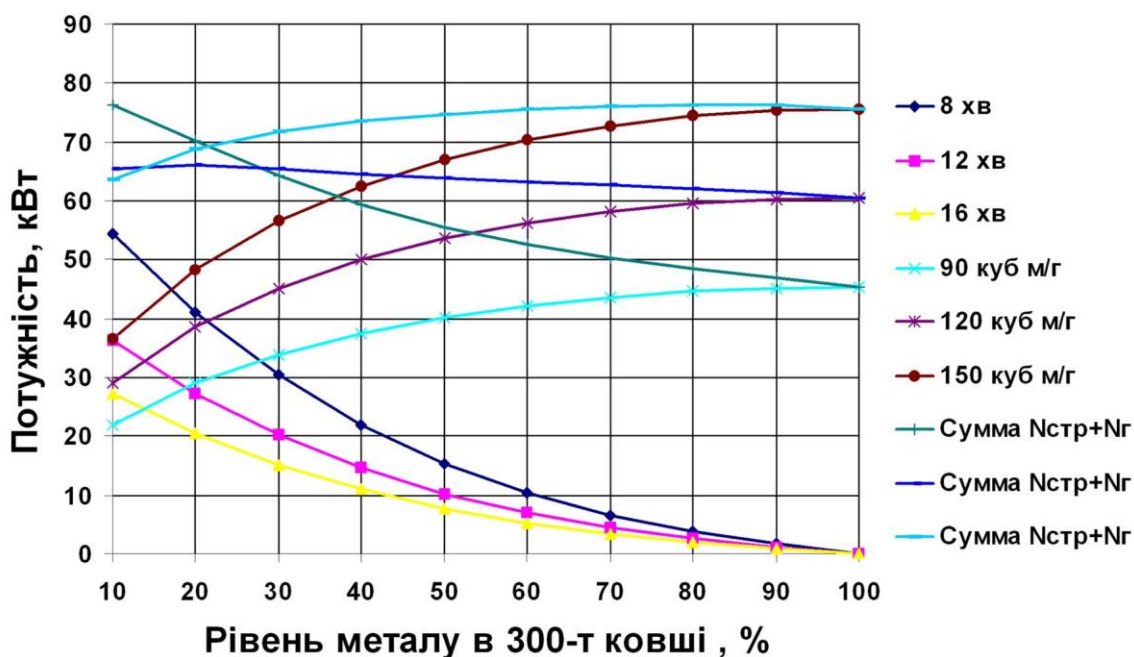


Рисунок 2.1 - Потужність перемішування металу в 300-т ковші падаючим струменем, інертним газом і їх сума при різній тривалості випуску і витраті газу

Сумарна потужність перемішування при всіх параметрах випуску та продувки інертним газом коливається у вузьких межах 45,37 - 76,27 кВт, що забезпечує стабільність в перемішуванні розплаву при його комплексній обробці.

## 2.2. Дослідження впливу продувки металу інертним газом на хімічну однорідність сталі марки 17Г1СУ

Аналіз роботи мартенівського цеху комбінату «Запоріжсталь» за останні роки показав, що найбільша кількість браку і беззамовної продукції, пов'язаних з хімічною неоднорідністю сталі, має місце при виробництві сталі марки 17Г1СУ.

Низьколегована сталь марки 17Г1СУ, що виплавляється за технічними умовами і призначена для виробництва прямошовних труб діаметром 1020 і 1920 мм для магістральних газонафтопроводів, займає особливе місце (27%)

у загальному виробництві низьколегованої сталі в мартенівському цеху «Запоріжсталь». Хімічний склад сталі наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад марки 17Г1СУ, %

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
			не більше				
0,15–0,20	1,15–1,55	0,40–0,60	0,020	0,025	0,3	0,3	0,3

З таблиці 2.1 видно, що сталь марки 17Г1СУ характеризується дуже вузькими межами за змістом марганцю і кремнію у готовій сталі, гранично низьким вмістом сірки та фосфору серед усього сортаменту виплавленої сталі. Це призвело до необхідності змінити технологію виплавки сталі в 500-т мартенівських печах, запровадивши обробку сталі інертним газом і додаткову десульфуріацію металу твердими шлакоутворюючими сумішами.

Обробка паспортних даних показала, що в мартенівському цеху «Запоріжсталь» використовується три варіанти розкислення і легування сталі марки 17Г1СУ (таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 - Варіанти розкислення і легування і чад елементів при виплавці сталі марки 17Г1СУ у 500-т мартенівських печах «Запоріжсталь»

Варіант розкислення і легування	Витрата розкислювачів, кг / т					Середній вміст у готовій сталі, %	Чад, %		
	в піч	в ковш							
	SiMn	SiMn	FeSi	FeTi	Al	Mn	Si	Mn	Si
1	23,13		4,48	1,57	0,8	1,325	0,477	31,3	29,0
2	17,19	4,87	4,41	1,57	0,8	1,330	0,457	29,5	31,4
3	9,33	13,35	3,95	1,57	0,8	1,410	0,484	26,6	25,2

З таблиці 2.2 видно, що при розкисленні і легуванні сталі марки 17Г1СУ по 1 варіанту, при якому весь марганець у вигляді силікомарганцю вводиться у піч, угар марганцю (31,3%) найвищий, а середній вміст марганцю у готовій сталі (1,325%) найнижче.

При розкисленні і легуванні сталі марки 17Г1СУ по 2 варіанту, коли в піч вводиться близько 80% марганцю, його чад знижується проти 1 варіанту на 0,8% абс.

Однак чад кремнію при цьому максимальний (31,4%) і вміст кремнію в готовій сталі (0,457%) найнижче.

При розкисленні і легуванні сталі марки 17Г1СУ по 3 варіанту, при якому в піч вводиться тільки ~40% марганцю у вигляді силікомарганцю, угар марганцю і кремнію мінімальні (25,6% та 25,2% відповідно), а їх середній вміст в готовій сталі найвищий (1,41% і 0,484% відповідно).

З урахуванням середнього хімічного складу готової сталі цей варіант є найефективнішим серед розглянутих варіантів розкислення й легування.

Для дослідження хімічної неоднорідності сталі марки 17Г1СУ при виробництві з продувкою інертним газом і без (з урахуванням варіанту розкислення і легування) проведена дослідно-промислова партія плавки (94 шт.) з по-піддоним відбором проб металу у процесі розливання.

Аналіз проб металу виконаний центральною хімічною лабораторією ЦЛК «Запоріжсталь».

Хімічна неоднорідність сталі марки 17Г1СУ за вмістом марганцю і кремнію при роботі з обробкою сталі інертним газом і без неї для 1, 2 і 3 варіантів розкислення і легування наведені в таблицях 2.3 та 2.4.

З таблиці 2.3 видно, що при виплавці сталі марки 17Г1СУ без обробки сталі в ковші інертним газом діапазон  $\Delta\text{Mn} = \text{Mn}_{\text{max}} - \text{Mn}_{\text{min}}$  знаходиться в межах від 0,01 до 0,26% (сер. 0,082%), а  $\Delta\text{Si} = \text{Si}_{\text{max}} - \text{Si}_{\text{min}}$  - в межах від 0,01 до 0,25% (сер. 0,096%). Такий розкид у вмістах марганцю і кремнію по ходу розливання сталі марки 17Г1СУ свідчить про недостатнє усередненні цієї сталі падаючим струменем металу при всіх варіантах розкислення й легування.

Таблиця 2.3 - Хімічна неоднорідність сталі марки 17Г1СУ без обробки інертним газом

Номер плавки	Варіант розкислення і легування	Тривалість, хв			Температура металу на випуску, град. С	ΔMn %	ΔSi, %
		післяпродувочного періоду	попереднього розкислення	випуску			
281	1	35	20	15	1630	0,09	0,15
280	1	40	20	20	1625	0,07	0,08
288	1	30	30	20	1620	0,11	0,09
156	1	30	15	20	1615	0,04	0,09
169	1	40	20	15	1625	0,12	0,03
184	1	105	15	15	1620	0,04	0,11
2111	1	25	10	15	1630	0,06	0,10
1153	2	30	25	15	1625	0,10	0,14
1178	2	40	15	20	1630	0,09	0,10
1182	2	30	30	15	1615	0,07	0,08
1186	2	35	25	10	1620	0,10	0,06
2176	2	60	15	25	1620	0,05	0,15
3191	2	35	20	20	1620	0,05	0,11
3200	2	35	10	30	1640	0,11	0,13
3214	2	30	30	40	1625	0,07	0,05
4203	2	40	20	20	1625	0,03	0,08
5180	2	30	15	20	1625	0,04	0,20
117	3	30	30	20	1650	0,08	0,14
119	3	30	25	15	1625	0,01	0,09
129	3	35	10	15	1625	0,09	0,03
142	3	30	20	15	1640	0,08	0,03
164	3	35	40	15	1615	0,07	0,07
167	3	30	15	15	1645	0,05	0,10
189	3	30	25	10	1610	0,04	0,08
192	3	45	25	10	1610	0,05	0,14
193	3	30	15	15	1625	0,10	0,09
1116	3	30	15	15	1630	0,07	0,06
1118	3	35	10	15	1620	0,07	0,05
235	3	30	30	30	1640	0,07	0,12
241	3	45	15	15	1630	0,09	0,07
248	3	30	20	15	1620	0,09	0,07
262	3	100	15	20	1625	0,04	0,07
279	3	30	30	20	1645	0,07	0,01
295	3	35	25	15	1625	0,06	0,06
298	3	30	20	15	1615	0,09	0,05
2118	3	45	15	15	1630	0,07	0,12
2126	3	45	20	15	1615	0,04	0,13
2129	3	30	20	15	1600	0,14	0,25
3133	3	45	10	15	1620	0,05	0,10
499	3	30	15	15	1615	0,03	0,05
4113	3	35	30	25	1640	0,26	0,19
4121	3	35	25	20	1620	0,09	0,13
4134	3	30	25	20	1625	0,07	0,11
590	3	30	10	15	1640	0,16	0,05
591	3	20	30	20	1600	0,19	0,17
592	3	30	20	30	1610	0,13	0,01

Таблиця 2.4 – Хімічна неоднорідність сталі марки 17Г1СУ, отриманої з обробкою металу в ковші інертним газом

Номер плавки	Варіант розкислення і легування	Тривалість, хв			Температура металу на випуску, град. С	ΔMn %	ΔSi, %
		післяпро дувочного періоду	попереднього розкислення	випуску			
272	1	40	20	15	1630	8	0,02
296	1	50	20	40	1625	20	0,04
187	1	30	10	15	1625	9	0,06
1120	1	35	20	15	1625	8	0,03
2141	1	50	15	20	1620	12	0,07
3101	1	20	20	25	1620	16	0,05
575	1	40	20	20	1620	12	0,01
1143	2	30	10	15	1625	8	0,02
1160	2	30	30	15	1640	7	0,05
1165	2	70	20	15	1635	8	0,03
1185	2	75	15	20	1620	12	0,04
2182	2	35	15	15	1615	8	0,07
2186	2	40	15	20	1625	13	0,03
4177	2	35	20	20	1620	14	0,07
4162	2	30	20	20	1630	12	0,05
4183	2	30	20	15	1615	8	0,05
4205	2	70	20	25	1625	16	0,03
15	3	60	25	15	1630	8	0,06
113	3	35	20	20	1630	12	0,01
118	3	40	20	15	1625	8	0,01
124	3	30	10	15	1630	7	0,03
152	3	25	30	15	1635	8	0,01
158	3	40	15	20	1625	12	0,02
162	3	35	20	15	1625	8	0,01
191	3	55	15	15	1635	7	0,03
194	3	35	15	15	1635	7	0,03
1110	3	30	15	15	1620	6	0,06
1122	3	45	30	30	1620	20	0,03
1155	3	30	20	15	1650	8	0,01
231	3	30	15	15	1630	7	0,05
236	3	40	15	15	1630	8	0,03
250	3	30	25	20	1645	12	0,04
251	3	40	15	20	1630	10	0,06
255	3	40	10	15	1630	8	0,01
2104	3	30	10	10	1620	6	0,04
2138	3	30	15	15	1625	8	0,01
3130	3	45	15	15	1615	8	0,01
3100	3	105	30	20	1640	13	0,04
3143	3	40	10	15	1640	8	0,04
4109	3	30	25	15	1625	8	0,04
4128	3	50	10	25	1620	12	0,05
4133	3	35	25	20	1625	11	0,01
4164	3	40	20	20	1625	13	0,03
5134	3	25	15	20	1620	12	0,06
5149	3	30	30	20	1630	15	0,02

При виробництві сталі марки 17Г1СУ з продувкою металу в ковші інертним газом (азотом) через шибєрний затвор протягом 7-20 хв. (Таблиця 2.4) хімічна однорідність сталі по ходу розливання значно вище. Діапазон  $\Delta\text{Mn}$  знаходиться в межах 0,01 - 0,08% (ср.0,035%),  $\Delta\text{Si}$  - 0,01 - 0,09% (ср.0,035%), що забезпечує відсутність браку та беззамовної продукції, пов'язаних з хімічною неоднорідністю сталі.

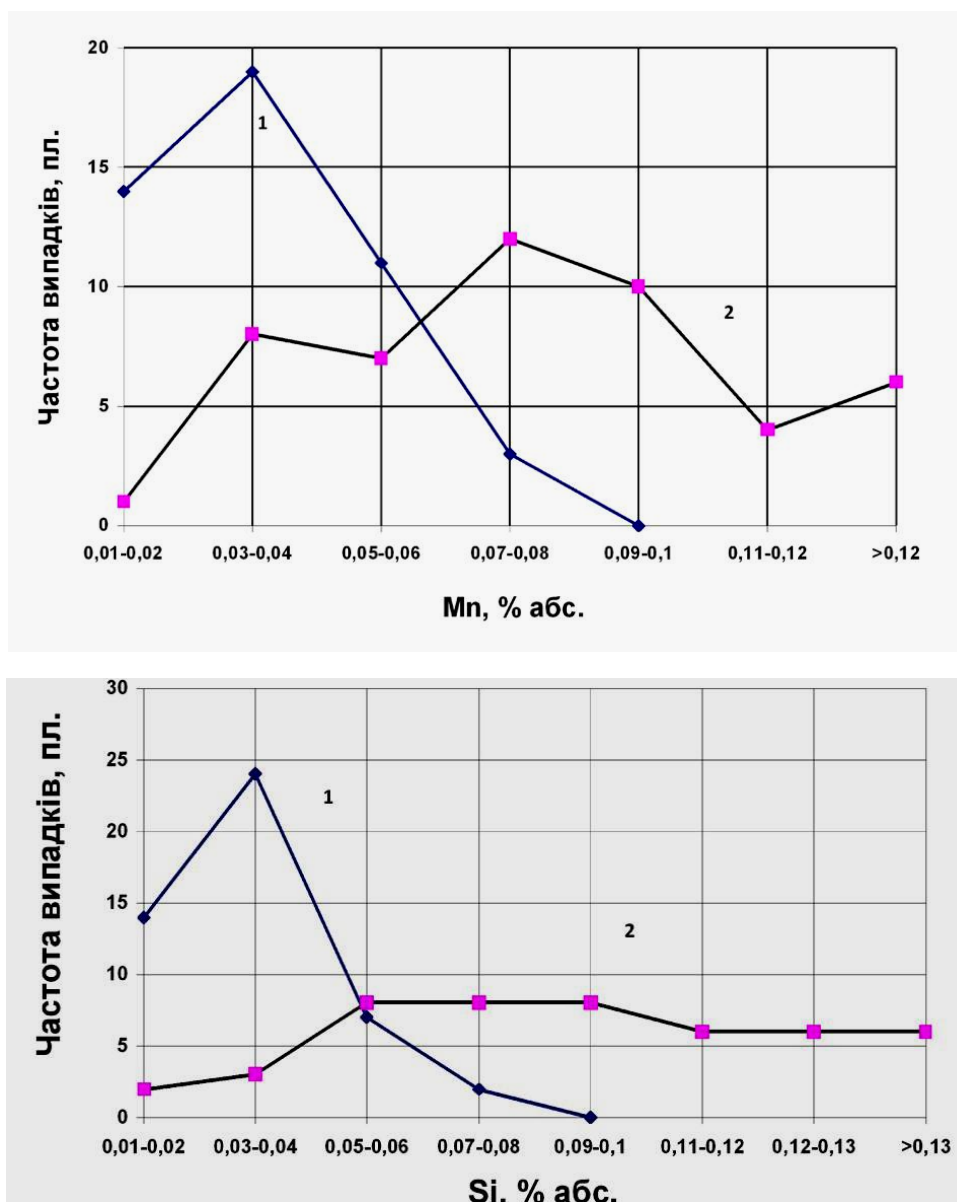


Рисунок 2.2 - Хімічна однорідність сталі марки 17Г1СУ за вмістом марганцю і кремнію при виплавці з продувкою (1) і без продування інертним газом в ковші (2)

Частотні характеристики величин  $\Delta Mn$  і  $\Delta Si$ , що характеризують неоднорідність сталі марки 17Г1СУ при її виробництві з продувкою металу в ковші через шибєрний затвор інертним газом (криві 1) і без обробки інертним газом (криві 2) наведені на рисунку 2.2.

З рисунка 2.2 видно, що тільки частотні характеристики варіанту з продувкою сталі інертним газом мають вигляд нормальних розподілів. Максимуми цих частотних характеристик (40,4% випадків для  $\Delta Mn$  та 51,1% випадків для  $\Delta Si$ ) припадають на значення  $\Delta Mn$  і  $\Delta Si$  рівні 0,03 - 0,04%.

### 2.3. Ефективність обробки сталі в 300-т сталерозливному ковші твердими шлакоутворюючими сумішами

На першому етапі досліджень було розглянуто можливість десульфурації сталі в ковші тільки вапном.

Параметри дослідних плавок, проведених з обробкою сталі в ковші лише вапном, наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Параметри дослідних плавок, проведених з обробкою сталі у 300-т ковші вапном

№ п/п	Номер плавки	Марка сталі	$\tau_{\text{вип}}$ , хв.	Температура металу, °С	Витрата вапна, кг/т	$S_o$	$S_k$	розрахунковий коефіцієнт ефективності процесу десульфурації E
1	7515	5пс	25	1620	5,0	0.038	0.034	0.0222
2	8515	3пс	30	1605	5,0	0.049	0.045	0.0170
3	9489	17Г1С	20	1630	2,7	0.041	0.038	0.0281
4	9471	15Г	15	1620	5,3	0.040	0.035	0.0252
5	0415	20	25	1615	3,4	0.043	0.038	0.0364
6	0484	17Г1С	30	1620	5,0	0.044	0.038	0.0293
7	0516	40	30	1605	5,0	0.045	0.040	0.0236
8	3710	09Г2	15	1640	3,4	0.041	0.037	0.0302
9	6659	17Г1С	50	1625	6,7	0.045	0.040	0.0176

З таблиці 2.5 видно, що розрахунковий коефіцієнт ефективності процесу десульфурації сталі в ковші знаходиться в межах 0,0170-0,0302 (сер.0,0255), що,

як показали подальші дослідження, свідчить про низьку ефективність цього варіанта і його неможливість при комплексній обробці сталі.

У дослідженнях другого етапу, виконаних у мартенівському цеху «Запоріжсталь», була використана тверда шлакоутворююча суміш, що представляє собою механічну суміш трьох компонентів у наступному співвідношенні, мас. %:

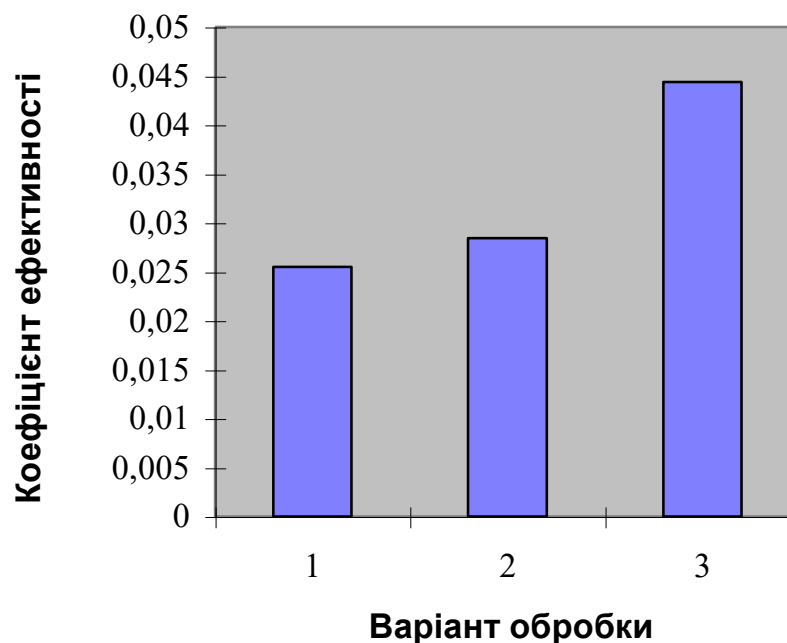
- вапно фракції 5-15 мм - 55-50;
- плавиковий шпат марки ФК75 за ГОСТ 7618 фракцією не більше 50 мм-35-40;
- магнезитовий порошок марки ПМК85 за ТУ 14-209-76 фракцією не більше 10 мм - 5-10.

Витрата ТШС коливалася в межах 1-1,5% від маси металу.

Відповідно до технологічної інструкції при обробці сталі ТШС допускався випуск металу з вмістом сірки на 0,012% вище вимог ГОСТ та ТУ, температура металу на випуску мала на 100С перевищувати температуру, зазначену в техінструкції.

Присадка ТШС в ківш проводилася з короба за допомогою розливного крана.

Результати цих досліджень представлені в табл. 2.6, 2.7 та на рис. 2.3,2.4.



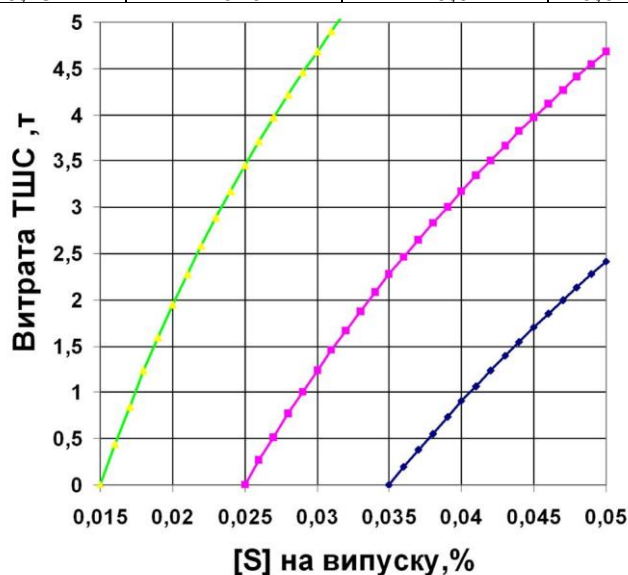
1 - обробка сталі вапном; 2 - обробка сталі ТШС; 3 - комплексна обробка сталі ТШС та інертним газом

Рисунок 2.3 - Залежність коефіцієнта ефективності від варіанту обробки



Таблиця 2.6 - Параметри дослідних плавки, проведених з обробкою сталі марки 17Г1СУ у 300-т ковші твердими шлакоутворюючими сумішами (ТШС)

№п/п	Номер плавки	[С], %	Тем-ра металу, °С	Витрата ТШС, кг/т	S <sub>o</sub>	S <sub>к</sub>	E
1	169	0,14	1625	13,3	0,029	0,018	0,0359
2	3101	0,16	1620	13,3	0,030	0,019	0,0343
3	3143	0,16	1625	13,3	0,030	0,020	0,0305
4	1165	0,12	1635	13,3	0,024	0,019	0,0176
5	1178	0,11	1630	6,7	0,019	0,018	0,0081
6	3214	0,09	1625	6,7	0,030	0,026	0,0214
7	4177	0,11	1620	13,3	0,031	0,020	0,0330
8	119	0,12	1625	10,0	0,027	0,018	0,0405
9	129	0,12	1625	10,0	0,029	0,020	0,0372
10	158	0,17	1625	13,3	0,024	0,016	0,0305
11	164	0,13	1615	13,3	0,032	0,018	0,0433
12	189	0,12	1610	13,3	0,026	0,020	0,0197
13	191	0,15	1635	6,7	0,024	0,018	0,0429
14	193	0,15	1625	11,7	0,024	0,018	0,0246
15	1110	0,15	1620	13,3	0,030	0,019	0,0343
16	1116	0,17	1630	13,3	0,028	0,018	0,0332
17	1122	0,16	1620	6,7	0,030	0,026	0,0214
18	1155	0,17	1650	13,3	0,029	0,019	0,0318
19	236	0,12	1630	13,3	0,031	0,020	0,0330
20	241	0,15	1630	13,3	0,028	0,018	0,0332
21	250	0,10	1645	13,3	0,028	0,020	0,0253
22	255	0,17	1630	13,3	0,024	0,020	0,0137
23	262	0,16	1625	11,7	0,024	0,016	0,0347
24	279	0,18	1645	13,3	0,030	0,020	0,0305
25	295	0,08	1625	11,7	0,026	0,020	0,0224
26	298	0,13	1615	13,3	0,029	0,020	0,0279
27	2104	0,14	1620	13,3	0,027	0,018	0,0305
28	2118	0,17	1630	13,3	0,022	0,018	0,0151
29	2129	0,10	1600	13,3	0,032	0,022	0,0282
30	2138	0,13	1625	13,3	0,025	0,019	0,0206
31	3130	0,16	1615	13,3	0,035	0,024	0,0284
32	3133	0,15	1620	10,0	0,025	0,020	0,0223



1 - [S]<sub>г.с.</sub> = 0,035%; 2 - [S]<sub>г.с.</sub> = 0,025%; 3 - [S]<sub>г.с.</sub> = 0,015%.

Рисунок 2.4 - Номограма для визначення витрати ТШС в залежності від вмісту сірки в металі на випуску

Таблиця 2.7 - Параметри дослідних плавок, проведених з комплексною обробкою сталі марки 17Г1СУ у 300-т ковші ТШС та інертним газом

№ п/п	Номер плавки	[C], %	Тем-ра металу, °C	Витрата ТШС, кг/т	S <sub>o</sub>	S <sub>к</sub>	E
1	272	0,15	1630	11,7	0,029	0,020	0,0318
2	281	0,15	1630	13,3	0,029	0,018	0,0359
3	280	0,15	1625	6,7	0,025	0,017	0,0573
4	288	0,15	1620	13,3	0,028	0,015	0,0469
5	296	0,16	1625	13,3	0,030	0,018	0,0384
6	156	0,17	1615	10,0	0,032	0,016	0,0693
7	187	0,12	1625	11,7	0,025	0,017	0,0360
8	1120	0,17	1625	13,3	0,030	0,017	0,0427
9	2111	0,15	1630	10,0	0,025	0,017	0,0386
10	2141	0,14	1620	13,3	0,029	0,014	0,0548
11	575	0,15	1620	6,7	0,022	0,016	0,0475
12	1153	0,15	1625	13,3	0,033	0,020	0,0377
13	1160	0,14	1640	10,0	0,030	0,019	0,0457
14	1178	0,11	1635	13,3	0,025	0,016	0,0336
15	1185	0,16	1620	13,3	0,030	0,019	0,0343
16	1186	0,12	1620	10,0	0,029	0,019	0,0423
17	2176	0,18	1620	13,3	0,031	0,019	0,0346
18	2182	0,15	1615	10,0	0,028	0,018	0,0442
19	2186	0,14	1625	13,3	0,028	0,016	0,0421
20	3191	0,16	1620	13,3	0,029	0,018	0,0359
21	3200	0,10	1640	13,3	0,027	0,017	0,0348
22	4162	0,19	1630	13,3	0,028	0,016	0,0421
23	4183	0,11	1615	5,0	0,026	0,020	0,0525
24	4203	0,10	1625	13,3	0,027	0,017	0,0348
25	4205	0,10	1625	13,3	0,027	0,017	0,0348
26	5180	0,16	1625	6,7	0,023	0,018	0,0366
27	15	0,11	1630	6,7	0,025	0,018	0,0490
28	113	0,10	1630	6,7	0,023	0,016	0,0542
29	117	0,12	1650	10,0	0,026	0,013	0,0693
30	118	0,12	1625	10,0	0,034	0,015	0,0818
31	124	0,13	1630	10,0	0,033	0,020	0,0501
32	142	0,11	1640	13,3	0,035	0,022	0,0349
33	162	0,11	1625	13,3	0,032	0,019	0,0392
34	167	0,11	1645	13,3	0,029	0,018	0,0359
35	194	0,17	1635	6,7	0,029	0,016	0,0888
36	1118	0,15	1620	13,3	0,035	0,020	0,0421
37	231	0,19	1630	13,3	0,035	0,020	0,0421
38	235	0,11	1640	13,3	0,034	0,020	0,0399
39	248	0,11	1620	13,3	0,037	0,019	0,0501
40	251	0,15	1620	13,3	0,037	0,020	0,0463
41	2126	0,12	1615	13,3	0,036	0,020	0,0442
42	3100	0,13	1640	13,3	0,025	0,016	0,0336
43	3143	0,16	1640	10,0	0,026	0,018	0,0368
44	499	0,13	1615	11,7	0,027	0,018	0,0347
45	4109	0,16	1625	13,3	0,030	0,019	0,0343
46	4128	0,12	1620	10,0	0,025	0,018	0,0329
47	4164	0,11	1625	13,3	0,034	0,018	0,0478
48	590	0,16	1640	13,3	0,033	0,020	0,0377
49	592	0,10	1610	8,3	0,035	0,020	0,0674
50	6134	0,16	1620	10,0	0,030	0,020	0,0405

#### 2.4. Дослідження засвоєння РЗМ, що вводяться в складі спеціальних комплексних сплавів

Як встановлено раніше, найбільш ефективними лігатурами на основі РЗМ є комплексні сплави, що містять, крім РЗМ, сильний розкислювач (Al, Si і т.д.). Для забезпечення високого засвоєння РЗМ вводити комплексні сплави рекомендується в глибоко розкисленні сталі, тобто після присадки всіх розкислювачів.

Разом з тим, вплив хімічного складу рекомендованих комплексних сплавів з різним вмістом РЗМ на ступінь засвоєння РЗМ при введенні їх в розкислену сталі в рівнозначних умовах раніше не розглядалося.

Дослідження засвоєння РЗМ, що вводяться в складі комплексних сплавів з різним вмістом РЗМ, проведено в напівпромислових умовах в ковшах місткістю 5 т.

Циліндричні зразки комплексних лігатур, що містять 5, 15, 25, 35 і 45% РЗМ були виплавлені в 10 кг вакуумної індукційної печі з використанням у вигляді шихти FeCe, Al, 90% FeSi і SiCa.

Присадку отриманих комплексних сплавів з витратою в перерахунку на РЗМ 0,3 кг/т здійснювали під струмінь розкисленої сталі в шматках розміром 20-30 мм за одну хвилину до закінчення випуску сталі з електропечі. Температура сталі на випуску була в межах 1615-1625 °С. Відбір проб металу проводився згідно ходу розливання сталі за ливарними формами.

Залежність ступеня засвоєння РЗМ сталлю від його вмісту в комплексному сплаві носить гіперболічний характер і з збільшенням вмісту РЗМ у комплексному сплаві величина засвоєння його сталлю різко знижується.

Отримана залежність має вигляд

$$Y_{m,M} = 23,5 + \frac{910}{10 + [m,M]}, \quad R = 0,91$$

де  $Y_{РЗМ}$  - ступінь засвоєння РЗМ сталлю, %

[РЗМ] - вміст РЗМ у комплексному сплаві, %.

Враховуючи отриману залежність, в якості основних вимог при виборі хімічного складу комплексної лігатури з РЗМ для мікролегування низьколегованих марок сталі належить таке:

- комплексні сплави повинні містити не більше однієї третини РЗМ і не менше однієї третини сильних розкислювачів (Al, Si та ін), що дозволяє мати величину засвоєння РЗМ не менше 40%;
- до складу комплексного сплаву повинен входити один з лужноземельних елементів (Ca, Mg та ін), що істотно поліпшують розливання легованих РЗМ сталей;
- інші елементи комплексних сплавів повинні бути легуючими компонентами виплавлених сталей.

На підставі вищевикладеного, для легування сталі 09Г2С обраний комплексний сплав ФС30РЗМ30, що містить, %: РЗМ - 33,0; Al - 8,0; Si - 44,0; Ca - 4,6; Mg - 0,2; Cu - 0,8; С - 0,02; сталі 10ХСНД - комплексний сплав АКЦТ-БР, що містить, %: РЗМ - 23,5; Al - 30,0; Ti - 6,0; Ca - 4,5; Ni - 28,9.

## 2.5. Дослідження механізму плавлення лігатур на основі РЗМ в сталі

Дослідження механізму плавлення вибраних комплексних сплавів у розкисленій сталі вироблено з використанням методу "занурення", сутність якого полягає в одночасному зануренні в метал групи зразків одного діаметра і маси з витяганням їх по одному через фіксовані проміжки часу.

Метод "занурення" дозволив вивчити механізм плавлення комплексних сплавів в сталі у реальних рівнозначних умовах.

Циліндричні зразки з комплексних сплавів діаметром 48 мм і масою 1 кг з "вмороженими" по осі металевими штирями були виготовлені в кріптовій печі.

Після розплавлення комплексного сплаву в магнезитовому тиглі піч вимикалася і в момент кристалізації осьової частини зразка строго по його осі на глибину 35 мм "вморожувався" металевий штир діаметром 10 мм і до-

вжиною 90 мм. Для надійності кріплення на кінцях штирів були виконані розрізи у вигляді «ластівчиного хвоста».

Охолодження зразків з піччю дозволило усунути усадочні скориночки і зняти термічні напруги в зразках.

З охолодженням системи до кімнатної температури тиглі обережно сколювали, а витягнуті зразки зачищались від пригару і окислів на наждачному верстаті. Після проміру та зважування зразки кріпилися в металевих трубках. Для цієї мети в штирях і на кінцях трубок були просвердлені отвори під шплінти.

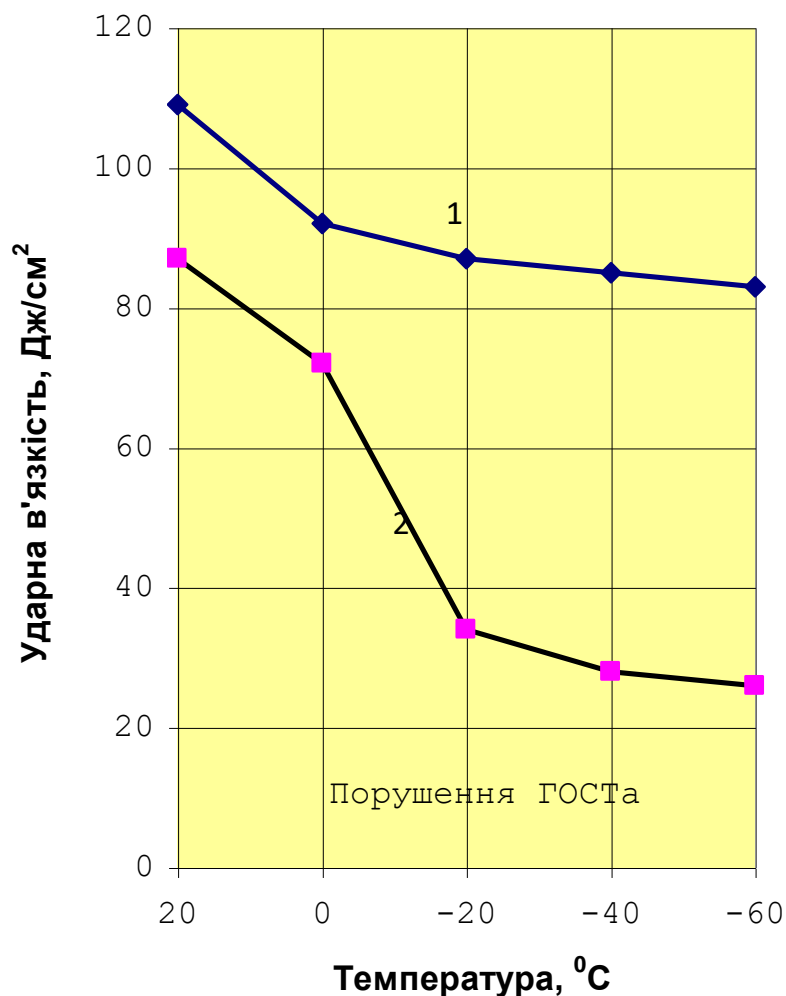
Занурювана частину металевих трубок футерована в декілька шарів магнезитової пудрою на рідкому склі з ретельним прокалюванням кожного шару.

Дослідження проведено в напівпромислових умовах в ковшах місткістю 5 т. Після випуску сталей 09Г2С та 10ХСНД в ковшах, скачування шлаку і виміру температури сталі термопарою занурення (результати виміру 1600 і 1650°C), в метал одночасно на глибину 0,3 м занурювалося по 6 зразків з комплексних сплавів ФС30РЗМ30 і АКЦТБР, що дозволило мати однакові вихідні параметри плавлення комплексних сплавів з РЗМ.

Витяг зразків вироблено по черзі протягом 40 с. Тривалість витримки в сталі останнього зразка визначалася розрахунковим шляхом на підставі кінетичних закономірностей плавлення легкоплавких феросплавів в аналогічних умовах [72]. Це дозволило отримати всі зразки до завершення процесу їх розплавлення.

#### Результати експериментів

Вид витягнутих з металу зразків комплексного сплаву ФС30РЗМ30 після витримки їх у сталі 10, 20, 25, 30, 35, 40 з представлений на рисунку 2.3.



1 - дослідна сталь; 2 - контрольна сталь

Рисунок 2.3 - Залежність ударної в'язкості сталі марки 10ХСНД від температури випробувань

Видно, що на зразках комплексних сплавів з РЗМ спочатку наморожують, а потім розплавляється сталь, причому розплавлення намороженого шару сталі завершується раніше розплавлення всього зразка. Подальше плавлення нерасплавившоїся частини комплексного сплаву протікає в дифузійному режимі, тобто в режимі безперервного видалення розплаву.

Зважування та визначення лінійних розмірів витягнутих зразків і їх компонентів після порізки на алмазному колі дозволили вивчити механізм плавлення комплексних сплавів з РЗМ в часі.

Встановлено, що маса сталі на зразках наростає аж до 20 с, потім наможений шар сталі енергійно розплавляється не тільки з боку рідкої сталі, але і з боку закристалізованого сталі розплаву. Про це свідчить збільшення внутрішнього діаметра "сорочки" зі сталі, що кристалізується, істотна відмінність хімічних складів розплаву та комплексного сплаву ФС30РЗМ30, від контактної поверхні між сталлю, що кристалізується, і розплавом.

Ймовірно, процесу плавлення шару сталі з боку комплексного сплаву сприяє агресивна дія розплаву, викликане значним виділенням тепла при розчиненні в металі кремнію комплексного сплаву.

На підставі отриманих даних розплавлення комплексного сплаву слід розглядати як плавлення непрогрітого тепла обмежених розмірів з короткочасним збереженням розплаву на поверхні і завершенням прогресу при безперервному видаленні розплаву.

Тривалість плавлення шматків комплексного сплаву розміром до 50 мм у поперечнику не перевищує 1 хв., Тому рекомендовані лігатури на основі РЗМ можуть бути введені в сталерозливний ківш після присадки всіх інших феросплавів, але не пізніше, ніж за 1-1,5 хв. до появи шлаку.

### **3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ЗЛИТКА І ЯКІСТЬ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ**

Вплив комплексної обробки на макро-, мікроструктуру і хімічну неоднорідність 12,65 т листового злитку вивчено на сталі марки 10ХСНД.

Сталь, виплавлену в 600-т мартенівської печі за прийнятою в цеху технології, випустили в два 300-т сталерозливних ковша з рафінуванням ТШС у поєднанні з продувкою металу азотом. В один з ковшів за хвилину до появи шлаку був присаджений комплексний сплав АКЦТБР в кількості 0,7 кг/т у поєднанні з рафінуванням ТШС і продувкою азотом.

Сталь обох ковшів була розлита сифонним способом з лінійною швидкістю 0,27 м/хв. Мікролегований і контрольний злитки, взяті з других піддонів по ходу розливання, були розрізані вздовж осьової площини з отриманням темплетів, забезпечили вивчення макро-, і мікроструктури металу, природи і характеру розподілу неметалевих включень у ньому, хімічної однорідності сталі по висоті і ширині злитка.

Макроструктура злитку після комплексної обробки помітно відрізняється від контрольного більшою щільністю в центральних обсягах і особливим розподілом сірки. Область підвищеного вмісту сірки в осьовій частині даного злитку має конусоподібну форму і розташовується від донної частини до прибутковою.

Утворення цієї області можна пояснити перенесенням кристалів металу і їх уламків в нижню частину зливка. Основна маса оксисульфідів і сульфідів церію укрупнюється і видаляється з металу, а дрібнодисперсні - залишаються в металі і їх поверхня служить підкладкою для утворення центрів кристалізації. Так оксисульфідів і сульфідів церію виявляються в осях кристалів, збіднюючи междендритний простір сіркою. Оскільки ці кристали з церієм залишаються в металі, вміст сірки в місцях їх скупчення ("конус осадження" злитку) вище, ніж в інших зонах злитка. У результаті підприбуткова частина злитка додатково очищається від сірки.



Крім того, в мікролегованому зливку відсутні яскраво виражені "вуса".

Макроструктура контрольного злитку носить типовий характер.

Хімічну неоднорідність злитків оцінювали за результатами аналізу проб, відібраних на 20 горизонтах в 4-7 точках на кожному горизонті. Ступінь неоднорідності металу визначали за величиною області розсіювання елемента (P) у площині темплетам за формулою:

$$P = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E} * 100$$

де  $E_{\max}$ ,  $E_{\min}$ ,  $E$  - максимальний, мінімальний та середньозважений вміст елемента, %.

Вміст сірки в мікролегованому зливку коливається в межах 0,020-0,031% (сер. 0,0261%), в контрольному - 0,018-0,057% (пор. 0,0267%), тобто ступінь хімічної неоднорідності в 3,5 рази менше, ніж у контрольного.

Ступінь неоднорідності по іншим елементам наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Величина області розсіювання елементів в площині темплетів мікролегованого і контрольного злитків

Елемент	Мікролегований злиток				Контрольний злиток			
	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$E$	Ступінь неоднорідності металу P	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$E$	Ступінь неоднорідності металу P
Вуглець	0,09	0,12	0,1038	28,90	0,08	0,14	0,1091	110,50
Кремній	0,80	0,93	0,9007	11,10	0,76	0,99	0,8645	26,60
Марганець	0,67	0,78	0,7182	15,32	0,62	0,80	0,7013	25,67
Фосфор	0,011	0,015	0,01254	31,90	0,012	0,034	0,01488	80,65

Таким чином, комплексна обробка сталі марки 10ХСНД істотно знижує хімічну неоднорідність по ширині і висоті листового злитку, забезпечує зниження вмісту сірки в металі, більш високий вміст марганцю і кремнію.

Останнє пов'язано, ймовірно, з придушенням процесу вторинного окислення цих елементів в процесі розливання.

Металографічні дослідження литого металу з визначенням кількості неметалевих включень, їх форми і розташування показали суттєві відмінності за чистотою і мікроструктурі.

Встановлено, що мікролегований і контрольний злитки забруднені, в основному, неметалевими включеннями типу сульфідів і оксисульфідів, у меншій мірі - оксидами і силікатами. Останніх на мікрошліфах мікролегованого злитку значно менше.

У мікролегованому металі виявлені також поодинокі церієві включення, як правило, неправильної форми, а також складні сульфосилікати, іноді спільно з сульфідами.

У кількісному відношенні мікролегований метал значно менше забруднений неметалевими включеннями, особливо в головній частині і по осі злитка.

Змінилися також форми і характер розподілу неметалевих включень. У мікролегованому зливку вони мають переважно глобулярну форму, в контрольному - зосереджені, в основному, по межах зерен.

Злитки дослідної плавки, як мікролеговані, так і контрольні, були прокатані на блюмінгу з отриманням двох слябів від кожного зливка. Після маркування сляби були прокатані на стані 2800 на лист товщиною 30 мм за прийнятою в цеху технології. Листи піддавали термообробці по режиму: загартування з 930-950°C (час витримки 1 хв. на 1 мм смуги плюс 10 хв.) У воді під пресом, подальший високий відпуск при температурі 650-670°C (час витримки 2 хв. на 1 мм товщини плюс 20 хв.) з охолодженням на повітрі. Від термооброблених листів були відібрані зразки для визначення механічних властивостей сталі і дослідження мікроструктури металу.

Міцнісні і пластичні характеристики при нормальній температурі визначалися при випробуванні на розтяг за ГОСТ 1497 на п'ятикратних зразках

типу М. Ударна в'язкість при знижених температурах визначалася за ГОСТ 9455 на зразках І типу.

Макроструктура металу вивчалася за знятими сірчаним відбитками, мікроструктура - на оптичному мікроскопі після хімічного травлення в 2-4% розчині азотної кислоти в світлому полі.

Встановлено, що міцнісні характеристики мікролегованого металу залишаються на тому ж рівні, що і у контрольного.

Так, межа міцності по мікролегованій сталі коливається від 540 до 610 МПа (сер. 571,7 МПа), у контрольній - від 540 до 590 МПа (сер. 564,6 МПа); межа текучості - у межах 390-455 МПа (сер. 418,3 МПа) проти 380-465 МПа (сер. 426,8 МПа) у контрольній.

Відносне подовження у мікролегованій сталі значно краще і коливається в межах від 28,0 до 31,0% (сер. 29,3%) проти 20,0-29,0 (сер. 24,0%) у контрольній.

Найбільш значний вплив робить мікролегування сталі на її ударну в'язкість, особливо, при низьких температурах.

Істотне підвищення ударної в'язкості низьколегованого металу можна пояснити розглянутим вище впливом комплексної обробки на кристалічну структуру і чистоту металу.

Фрактологічна оцінка зламів зразків ударної в'язкості після випробувань показує, що у сталі після комплексної обробки весь злам в'язкий, волокнистий, темно-попелястого кольору; на поверхні руйнування можна розрізнити голки й відколи. У міру зниження температури випробування частка кристалічної складової з крихким, зернистим зломом зростає незначно. У контрольній сталі злам більш грубозернистої за структурою і при негативних температурах випробування, в основному, зернистий.

Особливості комплексної обробки різних марок сталі розглянуті на прикладі сталі марок 10ХСНД і 09Г2С.

Вибір сталі марки 10ХСНД пов'язаний з виходом якісного листа протягом багатьох років не більше 90%. Тільки за останній рік в листопрокатних

цехах комбінату було відсортовано 10,5% листів сталі 10ХСНД, причому провали мали місце, в основному, по пластичних характеристикам

Дослідна партія плавки з комплексною обробкою сталі марки 10ХСНД сплавом АКЦТБР в кількості 1 кг/т, твердою шлакоутворюючою сумішшю в кількості 2-5 кг/т і продувкою інертним газом (азотом) через шибєрний за-твор з витратою 0,08-0,15 м<sup>3</sup>/т проведена у 500-т мартенівських печак.

Сталь виплавляли відповідно до технологічної інструкції.

Засвоєння РЗМ на дослідних плавках склало 34-42%. Відбір проб метал по ходу розливання показав, що метал дослідних плавки був досить однорідний за вмістом всіх основних компонентів.

Брак металу на першому переділі склав 0,78%.

Метал дослідних плавки прокатан на лист товщиною від 8 до 40 мм включно. Механічні випробування показали, що в результаті комплексної обробки сталі марки 10ХСНД з отриманням в ній 0,005-0,015% церію досягнуті: межа текучості в інтервалі 405-470 МПа, тимчасовий опір розриву - 550-660 МПа, відносне подовження - 22,0 - 28, 0%, ударна в'язкість при температурі мінус 40°С в межах 51 - 95 Дж/см<sup>2</sup> при вимогах ГОСТ 19281 мати межу текучості не менше 390 Н/мм<sup>2</sup>, тимчасовий опір розриву - не менше 510 Н/мм<sup>2</sup>, відносне подовження - не менше 19,% І КСУ-40 - не менше 44 Дж/см<sup>2</sup>.

Металографічні дослідження показали, що забрудненість металу сульфідами знизилася до 3,0-4,5 балів, оксидами строчно до 0,5-1,5 бала, оксидами точковими до 0,5 бала за полосчатості 0,5-4,0 бала і середньої величиною дійсного зерна 7-8 балів за ГОСТ 5639.

Низьколегована сталь марки 09Г2С обрана для комплексної обробки сплавом ФС30РЗМ30 в кількості 0,7 і 1,0 кг/т, твердою шлакоутворюючою сумішшю в кількості 1,5-4,0 кг/т і азотом з витратою 0,08-0,15 м<sup>3</sup>/т, як найзначніша за обсягом виробництва в мартенівському цеху «Запоріжсталь», але має брак листового прокату протягом ряду років 0,8%.

Дослідно-промислова партія плавок з витратами комплексного сплаву ФС30РЗМ30 в кількості 200 і 300 кг на плавку проведені у 500-т мартенівських печах і двохванному сталеплавильному агрегаті садкою 2 х 250 т.

Брак металу на першому переділі склав 0,06%.

Сляби дослідно-промислової партії плавок були прокатана на станах 2250 і 2800 на лист товщиною від 5 до 40 мм.

Рівень механічних властивостей металу дослідно-промислової партії плавок, а також вимоги ГОСТ 19282 до нормованих механічних характеристик наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Механічні властивості сталі марки 09Г2С після комплексної обробки з витратою сплаву ФС30РЗМ30 0,7 кг/т

Нормовані характеристики	Товщина листа, мм	Значення параметрів			
		за ГОСТ 19282	мінімальні	максимальні	середні
Межа плинності, МПа	5 – 10	345	320	420	374,2
	11 – 20	325	350	380	362,0
	22 – 40	305	350	395	367,7
Тимчасовий опір, МПа	5 – 10	490	470	590	536,0
	11 – 20	470	500	550	520,2
	22 – 40	460	510	540	523,3
Відносне подовження, %	5 – 10	21	22	36	28,6
	11 – 20	21	25	30	27,6
	22 – 40	21	25	28	27,4
Ударна в'язкість при $t = -40^{\circ}\text{C}$ , Дж/см <sup>2</sup>	5 – 10	39	36	120	64,7
	11 – 20	34	38	128	63,6
	22 – 40	34	43	119	90,2
Ударна в'язкість після механічного старіння, Дж/см <sup>2</sup>	5 – 10		33	134	67,8
	11 – 20		35	130	84,3
	22 – 40		46	75	62,6

З таблиці 3.2 видно, що найбільший розкид значень механічних характеристик спостерігається для листового прокату товщиною від 5 до 10 мм включно. Це зумовлено, мабуть, великим впливом механічних деформацій при прокатці на тонкий лист і недостатньою кількістю легуючих добавок, які стабілізують і підвищують механічні властивості сталі.

Розкид значень механічних властивостей для листів товщиною більше 10 мм істотно менше, а мінімальне значення параметрів вище вимог ГОСТ 19282, що забезпечило 100% вихід придатного листа.

Залежності механічних властивостей сталі марки 09Г2С після комплексної обробки з витратою комплексного сплаву ФС30Р3М30 0,7 кг / т від товщини листа в межах 5 - 20 мм мають вигляд:

$$\sigma_B = 513,26 + \frac{158,46}{B}, \quad R=0,735$$

$$\sigma_T = 353,3 + \frac{156,52}{B}, \quad R=0,851$$

$$\delta = 26,13 + \frac{22,09}{B}, \quad R=0,883$$

де: B - товщина листа, мм;

R - коефіцієнт кореляції.

Таким чином, із збільшенням товщини листа механічні властивості обробленої сталі знижуються, однак, в цілому, із збільшенням товщини листа перевищення значень механічних властивостей над значеннями ГОСТ 19283 зростає, тобто підвищується роль лігатури і знижується вплив механічних деформацій при прокатці металу.

Металографічні дослідження показали, що в обробленої сталі точкові оксиди і нітриди титану відсутні повністю, забрудненість металу сульфідами знизилася до 3-5 балів, оксидами строчно до 0,5-2 бали при полосчатості металу 2,5-3, бали і величиною дійсного зерна 8-9 балів за ГОСТ 5639.

Аналіз параметрів дослідно-промислової партії плавок з підвищеною до 300 кг на плавку витратою комплексного сплаву ФС30Р3М30 показав, що брак металу на першому переділі, пов'язаний з поясами і пленой, склав 0,2%.

Метал дослідних плавок був прокатан на лист товщиною від 5 мм до 40 мм включно.

Аналіз значень механічних характеристик листового прокату всіх товщин показав, що їх розкид після комплексної обробки сталі марки 09Г2С з

витратою комплексного сплаву 1 кг/т. Крім того, мінімальні значення механічних властивостей листового прокату для всіх товщин перевищують вимоги ГОСТ 19282.

Залежності значень механічних властивостей листового прокату від його товщини аналогічні поданим вище.

Таким чином, необхідні стабільність і значення механічних властивостей низьколегованої сталі марки 09Г2С досягаються при витраті твердої шлакоутворюючої суміші 1,5-4 кг/т, азоту - 0,08-0,15 м<sup>3</sup>/т і комплексного сплаву ФС30РЗМ30 1 кг/т при виробництві листового прокату товщиною від 5 до 10 мм включно і 0,7 кг/т - при виробництві прокату завтовшки більше 10 мм.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Характеристики повноти безпеки, рівень механізації та автоматизації обраного технічного процесу

Мартенівський цех відноситься до виробництва підвищеної небезпеки. У процесі виплавки та розливання сталі металурги працюють з рідкими металами та шлаками, працюють у гарячих умовах. Тяжка фізична робота в безпосередній близькості від джерела тепла призводить до перегріву організму. У процесі підготовки матеріалів та печей до плавки, заливки чавуну в змішувачі та печі, випуску та заливання сталі в робочу зону виділяється велика кількість пилу, променистої енергії, оксидів азоту та сірки та інших шкідливих речовин. Насичення цехів моторними мостовими кранами, заставними машинами та іншим електричним та механічним обладнанням створює небезпеку механічних пошкоджень та ураження електричним струмом. Обертуються та рухомі механізми та обладнання становлять серйозну небезпеку. Продуктами плавки є сталь і шлак, які при злипанні з печі вибухо- та пожежонебезпечні, викликають газоутворення та збільшують тепловиділення [68].

Про рівень механізації праці майстернях можна судити по таблиці 4.1.

### 4.2. Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища

При виплавці сталі у маршових печах виникають шкідливі виробничі чинники, що впливають безпечні умови. До таких факторів відносяться теплове та світлове випромінювання, пилогазові викиди у виробничі приміщення, шум та вібрація. Карта умов праці робочого містечка металургійного комбінату представлена у таблиці 4.2.



Таблиця 4.1- Розрахунок рівня механізації праці робітників цеху

№ п/п	Професія робітників	Штат робітників	Кіл-ть відпрацьованих людино-годин на добу			% механізованої праці
			Вручну	При допомозі машин	Усього	
1	Сталевар	5	-	216	216	86.4%
2	Підручний 7 р	5	108	108	216	
3	Підручний 6 р	4	134,6	57,4	192	
4	Підручний/р	3	96	-	96	
5	Підручний /з	4		192	192	
6	Підручний/п	1		24	24	
7	Підручний/про	1		24	24	
8	Машиніст /ем	36		864	864	
9	Машиніст /кр	28		672	672	

Таблиця 4.2 – Оцінка факторів виробничого середовища й трудового процесу на робочому місці сталевара

№ п/п	Фактори виробничого середовища й трудового процесу	Нормативне значення (ПДК)	Фактичне значення	III клас шкідливі й небезпечні умови й характер праці			Тривалість дії факторів за зміну, %	
				I міра	II міра	III міра		
1	Пил фіброгенної дії, мг/м <sup>3</sup>	4	143	-		35.8р	80	
2	Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup> 1 клас: хромікель марганець бенз(а)пирен 2 клас: мідь 3-4 клас: SO NO	0,01-0,05 0,05 0,00015 1,0-20,0 10,0 5,0	0,036-0,125 0,2 0,0003 1,15-80 37,5 29,5					
								3,6р
								2,5р
								1,7р
								4р
1,15р								
4р								
3,75р								
5,9р								
3	Вібрація, дБ	92	106		5		100	
4	Шум, дБ	80	89	9	-	-	80	
5	Мікроклімат у приміщенні (у теплий період) -Температура повітря, °C -Швидкість повітря, м/с -відносна вологість повітря, % -інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	27 0.5 70 140	40 0.8 40-50 2000-5000			13°C - - 5000	80 80 80 80	
								-
								1.6р
								-
6	Вага праці - категорії IIб Напруженість праці - помірковано - напружений							

Висновок: Тривалість щорічної додаткової відпустки за несприятливі умови праці становить 11 днів.

За класифікацією [69] у виробничій зоні мартенівського цеху переважають такі небезпечні виробничі фактори:

- Рух залізничного та автомобільного транспорту, переміщення кранів та закладних машин, чавуну, кристалізатора, сталевого лиття, шлаковозів.
- рухомі предмети, що рухаються, частини механічного обладнання;
- Наявність рідкого чавуну, рідких розплавлених продуктів, червоних злитків, що летять, крапель металу і шлаку.
- Висока напруга (до 380 В);
- стиснене повітря, газоподібний кисень та аргон;
- Пил у робочій зоні у місцях перевантаження сипких матеріалів.

#### 4.3. Опалення і вентиляція

Внаслідок виділення великої кількості надлишкового тепла в мартенівському цеху потрібен значний повітрообмін, особливо в літню пору.

Таблиця 4.3 – Значення прийнятих припустимих (оптимальних) параметрів повітряного середовища в робочій зоні виробничих приміщень

Характеристика промислових приміщень при підвищеному тепловиділенню	Категорія роботи з важкості	Період року (теплий, холодний) На постійних робочих місцях			Температура повітря поза постійними робочими місцями, °С
		Т <sub>повітря</sub> , °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с	
Більше 23 Вт/м <sup>2</sup>	Важка-3	15-26(18-20) 13-19(16-18)	75(40-60) 75(40-60)	0,2-0,6(0,4) Не більше 0(0,1)	15-25(20) 0-10(10)

Розміщення отворів необхідно для того, щоб збільшити повітрообмін улітку (шляхом відкривання обох рядів отворів), а взимку, закривши нижні прорізи, зменшити його й забезпечити підігрівши вступника за рахунок тепла приміщення перш ніж він дійде до робочих місць (рис. 4.1).

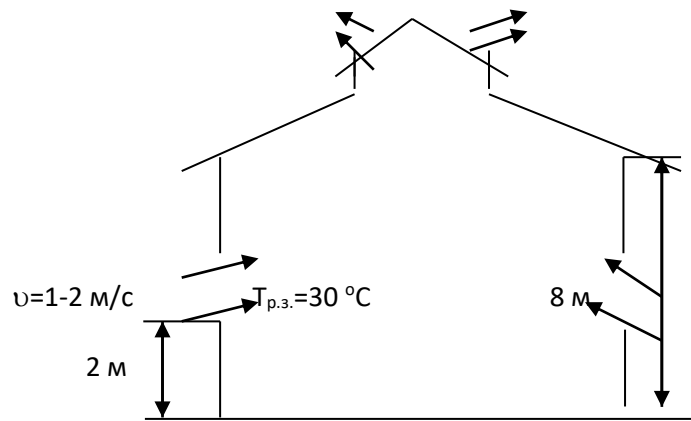


Рисунок 4.1 – Схема аерації

#### 4.4. Освітлення

Природне освітлення передбачено у приміщеннях, де постійно перебувають люди. Штучне освітлення використовується під час роботи у нічний час на виробничій ділянці.

Відповідно до [70], приміщення мартенівського цеху належать до VIII категорії у підрозділі А.

Визначаємо нормоване значення коефіцієнта природної освітленості (КПО):

$$e_n = e \cdot t \cdot c,$$

де  $e$  - значення КПО (%), обумовлене з урахуванням характеру зорової роботи,  $e=1\%$  ;

$t$  - коефіцієнт світлового клімату. Для IV пояса  $t=0,9$ ;

$c$  - коефіцієнт сонячності клімату,  $c=0,75$  [70].

$$e_n = 1 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 0,675\%.$$

Для штучного освітлення в мартенівському цеху використовуються лампи розжарювання потужністю 750 і 500 Вт. Для бічного освітлення - 80 шт. (750 Вт); для верхнього освітлення - 80 шт. (500 Вт).

Коефіцієнт запасу світильників залежно від запиленості дорівнює 1,7.

#### 4.5. Індивідуальні засоби захисту

Якщо неможливо забезпечити допустимі рівні шкідливості та небезпеки на виробництві технічними засобами, для захисту голови, очей та рук застосовують засоби індивідуального захисту, такі як спецодяг, спеціальне взуття тощо.

Залежно від вашої мети, ви повинні:

- від опіків - рукавички з комбінації тканини, брезенту та шкіри;
- від теплового випромінювання, іскор, металевих бризок - фетрові шапки, захисні каски з підшоломниками, текстильні або полікарбонатні каски, шкіряне взуття, особливо для спекотних робочих місць. Теплозахисний щиток для сталеварів, в окулярах, зі світлофільтром, захисна маска з прозорим екраном, захисні окуляри, забрало зі світлофільтром. Контактувати з нагрітими поверхнями для захисту ніг від теплового випромінювання, іскор та бризок розплавленого металу.

- Беруші використовуються для шуму.

- Респіратори (пелюстки) служать для захисту респіраторів робітників від пилу.

Спецодяг повинен мати захисні властивості, в тому числі можливість нагрівання внутрішніх поверхонь у будь-якій зоні до температури 400С за класифікацією [71].

#### 4.6. Виробничий шум, виробнича вібрація

В обох випадках з часом порушується вегетативна нервова система та/або виникають додаткові психоактивні реакції, що виникають із рівня 30 дБ [72].

Шум виникає при русі частин машин і механізмів, ударах, терті, русі пари, газів, димових газів, миттєвих змін інтенсивності тепловиділення.

Систематичний вплив вібрацій на людину викликає вібраційні захворювання (неврити) із втратою працездатності, при яких відбуваються зміни у серцево-судинній, нервовій та опорно-руховій системах.

Таблиця 4.6 – Гранично припустимі рівні віброшвидкості в активних смугах (дБ) відносно  $5 \cdot 10^{-3}$  см/с і відповідні їм величини (см/с) на робочих місцях

Сектор вібрації в октавних смугах зі середньгеометричними й граничними частотами, Гц	Віброшвидкості, ДБ	Віброшвидкості, см/с
125(90-180)	97	0,35

Вони супроводжуються такими ознаками: Механічні вібрації, що виникають під час руху автомобілів чи поїздів, роботи кранів та допоміжних механізмів.

Вібрації в мартенівському цеху біля печі викликаються поганою врівноваженістю обертових і рухомих частин машини, неточністю взаємодії окремих частин агрегату, впливом технічної природи процесу, нерівномірністю роботи навантаження на машину, що виникає під дією індукованих внутрішніх або зовнішніх динамічних сил, при русі машини [73,74].

#### 4.7. Міри пожежної безпеки мартенівського цеху

Мартенівський цех відноситься до категорії пожежної небезпеки [Г], так як стосується роботи з матеріалами в гарячому розплавленому стані променистого тепла і полум'я. Як паливо використовується газоподібне паливо.

Будівля цеху виконана із пожежобезпечних матеріалів: сталі, залізобетону. По вогнестійкості конструкцій цех відноситься до II ступеня [75].

Основними осередками заpalення є:

- мартенівська піч.
- заливка чавуну у піч та випуск сталі із печі.
- Упорскування сталі з жолоба.

Для евакуації людей у разі пожежі передбачено шляхи евакуації. Швидкість пересування людей за вимушеної евакуації становить 16 метрів за хвилину. Допустима довжина шляхів евакуації становить не більше 50 м для одноповерхових виробничих будівель I та II ступеня пожежної небезпеки для виробів категорії А та не більше 100 м для категорій Б та В. Евакуаційні виходи визначаються з розрахунку 0,6 ширини на 100 м<sup>2</sup>.

## ВИСНОВКИ

1. Простота, надійність і технологічність пристрою для продувки сталі в ковші інертним газом через шиберний затвор роблять його найбільш ефективним при розробці методів комплексної обробки мартенівської сталі в ковшах.

Розрахунком встановлено режим продувки сталі, що забезпечує постійну потужність перемішування металу в 300-т ковші протягом усього випуску.

Експериментально встановлено, що хімічна однорідність марки 17Г1СУ після такої продувки відповідає вимогам ТУ при всіх варіантах розкислення й легування.

2. Розроблено методику оцінки ефективності десульфурації сталі в ковші різними реагентами.

Експериментально встановлено, що максимальний ефект забезпечує обробка сталі ТШС з одночасною продувкою металом інертним газом через шиберний затвор.

Розроблено номограма для визначення витрати ТШС при комплексній обробці мартенівської сталі в 300-т ковшах.

3. Виконано аналіз впливу РЗМ на властивості сталі. Встановлено, що застосування РЗМ у чистому вигляді на ряду з комплексом позитивних впливів, в цілому, однак, не забезпечує всіх необхідних характеристик, тому що формує неметалеві включення і погіршує розливання сталі, що не дозволяє однозначно рекомендувати РЗМ для масового використання без низки додаткових умов.

На підставі експериментальних даних розроблено вимоги до хімічного складу комплексних лігатур з РЗМ, які забезпечують високе засвоєння РЗМ і покращують розливання сталі. Запропоновано використовувати як оптимальне, сплав АКЦТБР для сталі марки 10ХСНД і сплав ФС30РЗМ30 для сталі марки 09Г2С.

Розроблено методику вивчення механізму розплавлення лігатур в рівнозначних умовах, за допомогою якої встановлено, що механізм плавлення лігатур з РЗМ слід розглядати як плавлення тіла з короткочасним збереженням розплаву під шаром сталі і завершенням процесу при безперервному видаленні розплаву. Експериментально встановлено, що тривалість плавлення застосовуваних лігатур з РЗМ фракцією до 50 мм і витраті до 1,5 кг/т не перевищує 1 хв. Це дозволяє вводити лігатури з РЗМ після присадки всіх феросплавів в глибоко розкислений метал.

4. На основі отриманих результатів розроблена технологія отримання високоякісного злитку сталей 10ХСНД і 09Г2С в основу якої комплексне застосування лігатур з РЗМ, твердих шлакових сумішей та інертного газу (азоту).

На великому експериментальному матеріалі вивчено вплив запропонованої технології на механічні властивості литого і катаного металу, а також на його макро-і мікроструктуру і встановлено її позитивний вплив.

В умовах масового виробництва встановлено, що комплексна обробка низьколегованої сталі при вмісті в сталі 0,005 - 0,015% РЗМ забезпечує:

- отримання високоякісного злитку масою 12,65 т за макроструктурою та хімічною неоднорідності;
- підвищення експлуатаційних характеристик сталі, особливо ударної в'язкості (в середньому, у два рази) при низьких температурах.

Необхідні стабільність і значення механічних властивостей для сталі 10ХСНД досягаються при витраті сплаву АКЦТБР 1,0 кг/т, твердої шлакоутворюючої суміші 2 - 5 кг/т і азоту 0,08 - 0,15 м<sup>3</sup>/т, а для сталі 09Г2С досягаються при витраті твердої шлакоутворюючої суміші 1,5 - 4,0 кг/т сталі, азоту - 0,08 - 0,15 м<sup>3</sup>/т і сплаву ФС30РЗМ30Б - 1,0 кг/т при виробництві листового прокату від 5 до 10 мм включно і 0,7 кг/т для прокату завтовшки більше 10 мм.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кожов А.А., Низяев Г.И. Четуха В.И. Опыт размещения и эксплуатации установок для продувки сталі аргоном в ковше / Черная металлургия. Бюл. Ин-та "Черметинформация". 1984. Вып. 4 (960). С. 46,47.
2. Кругликов А.Н., Буланкин В.Е. Продувка металла инертными газами через пористые фурмы, установленные в днище ковша / Металлург. 1981. № 10. С. 23.
3. Мачикин В.И., Шестопалов В.Н., Еронько С.П. Продувка сталі азотом через шиберный затвор / Сталь. 1984. № 7. С. 21,22.
4. Мельник С.Г., Носоченко О.В., Ганошенко В.И. Внепечная десульфурация конвертерной сталі твердыми шлакоутворюючими смесями и аргоном / Металлург. 1983. № 7. С. 23,24.
5. Матушно Г.Г. Есть 200 миллионов тонн криворожской сталі / Металлург. 1982. № 12. С. 12.
6. Чуйко Н.М., Перевязко А.Т., Даничек Р.Е. Внепечные способы улучшения качества сталі. Киев: Техніка, 1978. 128 с.
7. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. Металловедение редкоземельных металлов. Москва: Наука, 1972 с.
8. Гордиенко С.П., Фуночка Б.В., Викеман Г.Ш. Термодинамика соединений лантаноидов: Справочник. Киев: Наукова думка, 1979. 376 с.
9. Глинка Н.Л. Общая химия: Учебное пособие для вузов. Ленинград: Химия, 1973. 704 с.
10. Горшков А.А., Затуловский С.С., Руденко Н.Г. Чугун с шаровидным графитом, обработанный редкоземельными модификаторами. Киев: Изд. АН УССР, 1964. 86 с.
11. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. Модифицирование и микролегирование чугуна и сталі. Москва: Металлургия, 1986. 272 с.

12. Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа; Справочное изд. Москва: Металлургия, 1986. 440 с.
13. Кубашевский О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа: Справочное изд. Москва: Металлургия. 1985. 184 с.
14. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. В 2-х т. Москва: Металлургия, 1962. 1487 с.
15. Комаров О.С. Формирование структуры чугунных отливок. Минск: Наука и техника, 1977. 224 с.
16. Маркс Г.Л., Кречман Л.Ф. Влияние редкоземельных металлов на термо-э.д.с. железа и железо-углеродистых сплавов / Изв.вуз. Черная металлургия. 1986. № 8. С. 15-24.
17. Куликов И.С. Раскисление металлов. Москва: Металлургия, 1975. 504 с.
18. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. Москва: Металлургия. 1969. 252 с.
19. Di Ting. Interaction between Rare-Earth Elements and Important Elements in Iron-base Solutions. Proc. Of the 2-nd Intern. 1991. V. 2. P. 906-910.
20. Тюрин А.Г., Михайлов Г.Г. Физико-химические исследования металлургических процессов. Сб. Науч. Тр. УПИ. Свердловск: Изд. УПИ. 1982. Вып. 10. С. 67-73.
21. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. Москва: Металлургия. 1987. 272 с.
22. Жуковицкий А.А., Шварцман Л.А. Физическая химия. Москва: Металлургия. 1976. 543 с.
23. Кряковский Ю.В., Николаев Е.Н., Явойский И.Н. Теория и технология новых процессов в производстве стали: Сб. Науч. Тр. МИСиС. Москва: Металлургия. 1968.

24. Уточкин Ю.Н., Бусиф А.А., Менделев В.А. Условия выделения неметаллических включений при введении в сталь РЗМ / Изв.вуз. Черная металлургия. 1984. № 7. С. 150-151.
25. Ланская К.А., Яровой В.В., Куликова А. В. Неметаллические включения и структура микролегированной стали 12Х1МФ / Сталь. 1985. № 5. С. 66-69.
26. Гладштейн Л.Н., Литвиненко В.А., Онучик Л.Г. Структура аустенита и свойства горячекатаной стали. Москва: Металлургия. 1983. 112 с.
27. Фонштейн Н.М., Лапин В.В., Милонская Т.З. Новые методы структурных исследований металлов и сплавов. Москва: 1982. С.164-168.
28. Yishi Yang. Effect of La on the isothermal tm brittle mnt of P-doped Ni–Cr steel / Int. Congr. Heat Treatment mater. Berlin. June 1985. № 3-7. P. 440-445.
29. Аверин В.В., Лопухов Г.А. Направление исследований в металлургии. Москва: ВИНТИ. 1978. 98 с.
30. Просвирин К.С., Зигало И.Н., Павленко Ю.А. К вопросу о природе неметаллических включений в стали с присадками РЗЭ / Изв.вуз. Черная металлургия, 1986. № 11. С.16-22.
31. Уточкин Ю.Н., Менделев В.А. Трансформация оксидных включений с РЗМ при охлаждении и повторном плавлении металла // Изв.вуз. Черная металлургия. 1987. № 7. С.166-167.
32. Лисицкий Б.С. Изучение изменения вязкостных характеристик жидкого металла в процессах раскисления и вторичного окисления. Автореф. Дис.канд. техн. наук. Москва: 1973. 23с.
33. Ефимов В.А., Скок Ю.Я. Современные методы введения раскислителей и модификаторов в жидкую сталь // В кн.: Тезисы Всесоюзного научно-технического семинара "Способы повышения эффективности применения легирующих, раскислителей и модификаторов для выплавки стали". Москва: ин-т "Черметинформация". 1984. С. 18, 19.

34. Бреус М.В., Косой Л.Ф. Способы обработки электростали редкоземельными элементами. Обзорная информация. Москва: Ин-т "Черметинформация". 1987. Сер. 20. Вып. 1. 22 с.
35. Клюев Ю.М., Григорян В.А. Влияние скандия и лантана на поведение азота при выплавке сплава ХН62МБКТЮ // Изв. Вуз. Черная металлургия. 1987. № 11. С. 143,144.
36. Ицкевич Г.М. Раскисление и модифицирование неметаллических включений. Москва: Металлургия. 1981. 296 с.
37. Скок Ю.Я., Мовчан М.Б., Алимов А.А. Модифицирование неметаллических включений в стали 17ГС / Сталь. 1983. № 8. С. 63-66.
38. Ефимов В.А., Скок Ю.Я. Перспективы применения комплексных сплавов в производстве стали // Сталь. 1981. № 10. С. 38-40.
39. Брик С.Д. Применение кальция и РЗМ для улучшения технологических и эксплуатационных свойств стали // Черная металлургия. Бюл. Ин-та "Черметинформация". 1980. Вып. 12. С. 9-25.
40. Зигало И.Н., Павленко Ю.А., Просвирин К.С. Улучшение качества стали при модифицировании РЗМ / Сталь. 1983. № 7. С. 26-28.
41. Sandor Simon, Gyula Karoly. A ritkafoldfemek dezoxidalo es microotvozo hatasanak sajatosasai. Banyasz es kohasz lapok. Konasz. 1978. III. 4. P. 145-150.
42. Bulkowski L. Przegląd osiągnięć w zakresie odsiarczania metala wdmuchiwanego sproszkowanymi materiałami do ciekłej stali w kadzi. - Hutnik.: 1983. № 9. P. 329-333.
43. Мовчан М.Б. Модифицирование неметаллических включений в сталях 20ГСЛ и 15Х1ФЛ добавками комплексного сплава силиций-иттрий-мишметалл / Проблемы спец. Электрометаллургии. 1987. № 4. С. 80-85.
44. А.С. 530922 (СССН) Сплав для раскисления и легирования стали / С.Н. Примеров, В.Б. Вихляев, В.Д. Крапля, Г.К. Пряжников. Оpubл. В Б.И., 1976. № 46.

45. А.С. 556193 (СССР) Лигатура / Ю.С. Кучемасов, А.А. Снежко, Ю.Н. Таран и др. Оpubл. В Б.И., 1977. № 20.
46. Инжекционная металлургия - 80. Тр. Конференции / под ред. М.Ф. Сидоренко. Перев. с англ. - Москва: Металлургия. 1982. С. 5-7.
47. Петров Г.Ф., Гончар Б.С., Ефимов В.А. Разработка и исследование способа внепечной обработки чугуна в вихревых потоках / Киев: ИПЛ АН УССР. 1980. 50 с.
48. Найдек В.А. Новые процессы выплавки и обработки металлических расплавов // В кн.: Прогрессивные технологии литья и кристаллизации сплавов. Киев: ИПЛ АН УССР 1983. С. 10-22.
49. Молонов Г.Д., Сопелкин Н.Ф., Лепорский С.В. Кинетика кристаллизации крупных листовых слитков спокойной стали, отлитых с применением металлургического порошка / В кн.: Проблемы стального слитка. №7. ИПЛ АН УССР. Москва: Металлургия. 1978. С. 118-121.
50. Жидков В.Д., Рабин П.Б., Ефимов О.В. Безопасность технологии измельчения лигатуры РЗМ для микролегирования стали / Сталь. 1989. № 7. С. 41-42.
51. Шнееров Я.А., Черханов В.Д., Воронов Н.А. Опыт производства низкосернистых сталей повышенной прочности и хладноустойчивости для магистральных газопроводов в северном исполнении / 1980. № 2. С. 15-25.
52. Синельников В.А., Вяткин Ю.Ф., Новиков В.Н., Ефтеева В.Ф. Новые технологические процессы в черной металлургии / Сталь. 1988. № 10. С. 25-28.
53. Кислицин В.Ф., Бронфин Б.М. Влияние легирования ванадием, модифицирования и толщины отливки на микроструктуру и свойства стали 45Л / Изв. вуз. Черная металлургия. 1990. № 2. С. 70-72.
54. Елешна О.П., Селиванов М.В. Роль кальция и редкоземельных металлов в формировании структуры и свойств стали. Обзорная информация. Сер. Металловедение и термическая обработка. Москва: 1985. Вып. 1. 27 с.

55. Orehoski M.A., Keenan W.M. 64-th Steelmaking Conference Proseedings, Toronto, March 29 -Apr. 1. 1981. Y. 64. New York. P. 172-177.
56. Черевик Ю.Н., Стульпинос Б.Б., Гудонис И.Б. Повышение производительности установок микролегирования сталі / Сталь. 1988. № 8. С. 20-22.
57. Вихлевщук В.А., Поляков В.А., Пиптюк В.П. Исследование рациональной технологии микролегирования сталі РЗМ при разливке в слитки / В кн.: Разливка сталі в изложницы. Москва: Metallurgiya. 1984. С. 25-27.
58. Пархоменко П.А. Исследование и разработка технологии раскисления и модифицирования стали / Сталь. 1968. № 9. С. 842.
59. Вихлевщук В.А., Пиптюк В.П., Федорова И.П. Микролегирование сталі РЗМ при разливке в изложницы / Днепропетровск: Ин-т черной металлургии. 1988. 25 с. Деп. в Черметинформации 31.10.88. № 4979 - ЧМ 88.
60. Вихлевщук В.А., Пиптюк В.П., Шнееров Я.А. Рациональная технология микролегирования сталі редкоземельными элементами / Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 1986. № 1. С. 13-15.
61. Бреус М.В., Косой Л.Ф. Способы обработки электросталі редкоземельными элементами. Обзорная информация. Москва: ин-т "Черметинформация". 1978. Сер. 20. Вып. 1. 22 с.
62. Алешина Т.В. Совершенствование процесса легирования стали вне печи. Обзорная информация. Сер. "Сталеплавильное производство". Москва: Черметинформация. 1984. Вып. 2. 15 с.
63. Пат. 51-55063 ( Япония) Способы введения легирующих добавок в расплав сталі / Вада Канаме Такуо, Огибаяси Нариаки. Оpubл. В Б.И., 1977.
64. Чистяков В.Ф., Аверин В.В., Лясков И.В. Раскисление и микролегирование сталі алюминием и РЗМ при разливке сталі под экзотермическими

- шлакоутворюючими брикетами. - в кн.: Проблеми сталюого слитка // - Москва: Металлургия. 1976. № 6. С. 166-168.
- 65.Ишугуро М., Ито М. Влияние РЗМ на свойства высококачественных слитков. в кн.: Процессы раскисления и образования неметаллических включений в стали. Москва: Металлургия. 1977. С. 169-1882.
- 66.Ефимов В.А., Ищук Н.Я., Гарбуз В.А. Разработка и исследование технологии разливки стали с применением шлакообразующих и шлакометаллических гранулированных материалов. В кн.: Проблеми сталюого слитка / Москва: Металлургия. 1978. № 7. С. 154-157.
- 67.Жердев А.С. Исследование и разработка технологии внепечной комплексной обработки низколегированных сталей лигатурами на основе РЗМ в условиях массового производства. Автореф. Дис. канд. техн. наук. Киев : 1995. 24 с.
- 68.Трахтенберг И.М., Коршун М.М., Чебанов О.В. Гигиена труда и производственная санитария. – Киев, 1997.-464 с.
- 69.ДСТ 12.0.003-74 ССБТ. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори Класифікація. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://dnor.com.ua/>.
- 70.СПиП П.4-79 «Природне й штучне освітлення». СПиП 2.4-79 «Природне й штучне освітлення». [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=4999](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4999).
- 71.ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартів безпеки праці. Одяг спеціальний для захисту від підвищених температур теплового випромінювання, конвективної теплоти. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 12.4.221-2002, IDT). [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=54214](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54214).
- 72.ГОСТ 12.1.012-90 Система стандартів безпеки праці. Вібраційна безпека. Загальні вимоги. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=48132](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=48132).
- 73.ДСТУ 12.4.044-78 «Санітарні норми і правила роботи з машинами».

- 74.ГОСТ 12.4.045-87 Система стандартів безпеки праці. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=64482](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=64482).
- 75.ДСТУ Б В.1.1-4-98\*. Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://profidom.com.ua/v-1/v-1-1/1216-dstu-b-v-1-1-4-98-budivelni-konstrukciji-metodi-viprobuvan-na-vognestijkist-zagalni-vimogi>



**ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізька міська рада  
Запорізька обласна державна адміністрація  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Національний університет «Києво-Могилянська Академія»  
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Національний транспортний університет

## **МАТЕРІАЛИ**

II ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»

**18-20 жовтня 2022 року**

Запоріжжя

2022

**Висновки.** Таким чином, оптимальним температурним діапазоном для азотування з кінетичної точки зору слід вважати інтервал 900...1000 °С, однак за технологічними показниками необхідно обрати інтервал в межах 800...900 °С.

#### Список використаних джерел

1. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. Москва : Гостехиздат, 1948. 178 с.
2. Кравченко В.А., Серебренников, М.А. Рунов. Отработка технологии получения опытно-промышленной партии азотированного марганца. Лабораторные исследования параметров процесса азотирования металлического марганца. Запорожье : УкрНИИ Спецсталь, 1964. 42 с.
3. Блантер М.Е. Физические основы химико-термической обработки. Лекция № 24. Москва : Машгиз, 1949. 45 с.

УДК 669.1

Гриценко С.В. магістрант 2 курсу, Примасюк С.В. магістрант 1 курсу  
Науковий керівник – д.х.н., проф. Прутцьков Д.В.

### ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТА ЗАСТОСУВАННЯ ШЛАКОУТВОРЮЮЧИХ СУМІШЕЙ ПРИ КОМПЛЕКСНІЙ ОБРОБЦІ МАРТЕНІВСЬКОЇ СТАЛІ

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

**Актуальність.** Теорія і практика сталеваріння свідчить, що найбільш перспективні в забезпеченні стабільності механічних властивостей і підвищення якості металопрокату позапічна обробка сталі інертними газами, шлаковими сумішами і мікролегуєчими добавками на основі рідкоземельних елементів (РЗМ).

Але теоретичні основи одночасної обробки металу трьома перерахованими вище компонентами відсутні. Немає достатнього обсягу достовірної інформації про закономірності плавлення і розчинення лігатур з РЗМ, відомостей про взаємодію РЗМ з компонентами розплаву і видалення неметалевих включень із сталі. Відсутні дослідження впливу інертного газу і шлакових сумішей на структуру і якість металу при використанні їх у комплексі з РЗМ.

Відсутність відомостей про термодинамічні і кінетичні особливості одночасної обробки металу переліченими компонентами і зумовили проведення більш детальних досліджень такої комплексної обробки

Найбільш простим і ефективним засобом підвищення якості сталі відповідального призначення є обробка її твердими шлаковими сумішами (ТШС), які застосовуються в комплексі з продувкою металу в ковші інертними



газами. Основним завданням такої обробки є додаткове зниження вмісту сірки і неметалевих включень у готовій сталі.

**Мета.** Проаналізувати варіанти застосування шлакоутворюючих сумішей при комплексній обробці сталі на провідних підприємствах галузі.

**Основний текст.** До твердих шлакоутворюючих сумішів та шлаків, що формуються з них, пред'являються наступні вимоги:

- висока основність, з підвищеною розкислювальною здатність елементів - розкислювачів;
- велика розкисленість шлаку в процесі обробки ( $\text{FeO} < 0,5 - 1,0 \%$ );
- висока рідинорухливість шлаку;
- достатня кількість шлаку, яке визначається необхідним ступенем рафінування по сірці і температурними умовами обробки сталі;
- забезпечення розвиненої міжфазної поверхні за рахунок емульгування шлаку при випуску металу з великої висоти і додаткового перемішування шлаку з металом інертними газами (аргоном або азотом).

Як основний компонент для приготування ТШС зазвичай використовується металургійне вапно, в якості розріджуючих компонентів - плавиковий шпат або високоглиноземисті матеріали. Витрата шлакової суміші зазвичай не перевищує 1,0-1,5% від маси металу і визначається допустимим зниженням температури металу при обробці.

На Кузнецькому металургійному комбінаті при використанні шлакоутворюючих сумішей, що складається з 70% вапна і 30% плавикового шпату встановлено, що при витраті ТШС 0,5-1,6% від маси металу і крупності шматків суміші до 50 мм ступінь десульфурації металу в ковші становить 18,2-42,5%, брак металу по поверхневих дефектах знижується більш, ніж у 2 рази [1].

У киснево-конвертерному цеху комбінату «Азовсталь» ТШС до недавнього часу використовували при виробництві сталі марки 09Г2С [2] суміш, що складається з вапна фракції 10-30 мм і плавикового шпату фракції до 100 мм (у співвідношенні 3:1), в кількості 1,2-6,0 кг/т разом з феросплавами присаджують в ківш протягом першої хвилини випуску, після чого метал продувають аргоном (питома витрата аргону  $0,002-0,004 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв.})$  через фурму, що занурюється. Комплекс розроблених заходів дозволяв досягти середнього ступеня десульфурації металу 18-24%, тоді як на порівняльних плавках відзначена ресульфурація.

Аналогічна технологія використовується в киснево-конвертерному цеху №2 комбінату «АрселорМітталКривийРіг». ТШС, що складається з 60-65% вапна, 20-30% високоглиноземистих відходів хімічної промисловості і 10-15% плавикового шпату, додається в процесі випуску металу з конвертера, після чого сталь продувається аргоном через занурювану фурму. Така технологія забезпечує зниження вмісту сірки в готовому металі в середньому на 37%, підвищення пластичності металу на 10-13%, збільшення виходу заготовок по групі «А» на 7,7% [3].

**Висновки.** Таким чином, можна визнати, що найбільш ефективними компонентами ТШС є вапно та плавиковий шпат. Однак при використанні слід

враховувати їх співвідношення, технологію введення та витрату для отримання мінімального кінцевого вмісту сірки в сталі.

### Список використаних джерел

1. Мельник С.Г., Носоченко О.В., Ганошенко В.И. Внепечная десульфурация конвертерной стали твердыми шлакоутворюючими смесями и аргоном / *Металлург*. 1983. № 7. С. 23-24.
2. Матушно Г.Г. Есть 200 миллионов тонн криворожской стали / *Металлург*. 1982. № 12. С. 12.
3. Чуйко Н.М., Перевязко А.Т., Даничек Р.Е. Внепечные способы улучшения качества стали. Киев : Техніка, 1978. 128 с.

УДК 623.445.1; 004.94

Жолобко Б.О., магістрант 2 курсу  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Явтушенко А.В.

## ОТРИМАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО БАЛІСТИЧНО-ВИТРИВАЛОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ Тi-AL

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Актуальність розробки та отримання новітніх матеріалів для різноманітних галузей науки і техніки є сталою необхідністю. На наш час звичайні металічні сплави все менше задовільняють зростаючі потреби до фізико-механічних якостей матеріалів, що використовуються у високотехнологічних галузях виробництва. Військова промисловість не є виключенням і також має великий потенціал використання кардинально нових, та експериментальних матеріалів.

Метою отримання композиту на основі Ti-Al є створення засобів індивідуального захисту (далі ЗІЗ), або балістичного матеріалу загального призначення, що буде відповідати прийнятним стандартам захисту при кращих масо-габаритних, балістичних, фізико-механічних характеристиках.

Використання зазначених металів супроводжується їх відносно задовільними фізико-механічними якостями для поставленої мети, де керуючим фактором є щільність, та ударна в'язкість КСУ. Відомо, що параметр КСУ у пластинах бронежилетів виготовлених зі спеціальної броньової сталі (переважно сталі леговані марганцем) даний параметр разом з міцністю на руйнування є переважним від інших спеціальних марок сталі. Алюмінієві сплави достатньо давно використовуються як матеріал бронезахисту, але здебільшого у якості захисту легкої військової техніки: БМП, БМД, легкі танки. Тести стійкості термозміцненого сплаву 7039-T64 при обстрілі броньовою кулею калібром 7.62 мм при куті до нормалі 0°, та швидкістю 840 м/с показують рівноміцну стійкість зі сталюю бронєю важчою на 6%. Даний