

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)

До
Заклада
01.12.23р

Кваліфікаційна робота / проєкт

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Розробка технології виплавки безкремністих сталей

Виконав: студент II курсу, групи 8.1362-мчм
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Металургія чорних металів

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

В.Р.Хвостов

(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н., доц. Кириченко О.Г.

(дослід. вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент зав.каф., д.т.н., проф. Бслоконь Ю.О.


(дослід. вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2023

**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 
« 07 » 05 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Хвостову Владиславу Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка технології виплавки безкремністих сталей

керівник роботи Кириченко Олексій Геннадійович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 09 » жовтня 2023 року № 1580-с

2 Строк подання студентом роботи 10.12.2023




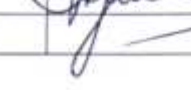
3 Вихідні дані до роботи Дослідити технологічні можливості виплавки безкремністих сталей

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Реферат; вступ; Загальна частина; Аналіз електросталеплавильних способів виробництва шарикопідшипникової сталі; Технологічна частина; 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 виконав	завдання прийняв
Загальна частина	Кириченко О.Г. доцент		
Аналіз електросталеплавильних способів виробництва шариконідшипникової сталі	Кириченко О.Г. доцент		
Технологічна частина	Кириченко О.Г. доцент		
Охорона праці та техногенна безпека	Кириченко О.Г. доцент		

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, реферат	21.11-25.11.2023	
2	Загальна частина	26.11-30.11.2023	
3	Аналіз електросталеплавильних способів виробництва шариконідшипникової сталі	01.12-04.12.2023	
4	Технологічна частина	05.12-08.12.2023	
5	Охорона праці та техногенна безпека	09.12-10.12.2023	
6	Висновки, перелік джерел посилання	10.12.2023	

Студент  (підпис) В.Р.Хвостов (ініціали та прізвище)Керівник роботи (проєкту)  (підпис) О.Г.Кириченко (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  (підпис) Ю.О.Бєлоконь (ініціали та прізвище)

Реферат

Пояснювальна записка: 85 с., 21 табл., 21 рис., 1 дод., 17 джерел.

СТАЛЬ, КРЕМНІЙ, ВИПЛАВКА, ПОЗАПІЧНА ОБРОБКА, ЯКІСТЬ, ШАРИКОПІДШИПНИКОВА СТАЛЬ, БЕЗКРЕМНІСТА СТАЛЬ

Мета роботи - дослідити фізико-хімічні особливості процесу виплавки безкремністих шарикопідшипникових та автолистових сталей з метою вдосконалення технології та можливості регулювання процесу.

Завдання роботи - на основі глибоких фізико-хімічних досліджень, використання останніх досягнень металургійної науки, розробити технологічні передумови для керування процесом виплавки та позапічної обробки безкремністих марок сталей. Це дозволить в значній мірі покращити якість сталі та прогнозувати її кінцевий хімічний склад.

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. вивчення основних положень класичної технології виплавки шарикопідшипникової сталі;
2. встановлення та дослідження проблеми отримання сталі з невеликим вмістом неметалічних включень;
3. дослідження виплавки шарикопідшипникової електросталі без кремнію;
4. дослідження технології виплавки безкремністої конвертерної сталі.

Об'єкт дослідження: процес виробництва та позапічної обробки безкремністих сталей.

Предмет дослідження: закономірності і механізми фізико-хімічних процесів виплавки безкремністих сталей та їх вплив на якість кінцевого продукту.

Методи досліджень: металографія, хімічний та мікроскопічний аналізи, статистичний метод, математичний аналіз.

Наукова новизна:

1. Встановлено, що розподіл домішок при затвердінні дозволив виділити основні фактори, що впливають на формування позацентрової хімічної неоднорідності. Розкислення робить істотний вплив на термодинамічні і кінетичні умови утворення сульфідів і розвиток ліквацийних шнурів. При зменшенні активності кисню від 40 до 8 ppm тип сульфідів змінюється від першого до другого і потім до третього. Експериментально також показано, що умови, характерні для виділення сульфідів другого типу, є сприятливими для утворення та сталого розвитку шнурів ліквациї.
2. Визначено, що кремній є чинником, що провокує розвиток дендритної і зональної ліквациї, впливаючи практично на всі параметри хімічної неоднорідності: коефіцієнт розподілу, висоту, ширину і питомий об'єм зони шнурів. Характерно, що зони шнурів в металі з вмістом кремнію $<0,1\%$ практично зникають навіть при концентрації сірки $\sim 0,01\%$ при масі зливка 40-50 т.
3. Дослідження осьових темплетів злитків свідчать про те, що використання вакуумного вуглецевого розкислення (ВУР) і зниженого вмісту кремнію поряд з глибоким рафінуванням металу від шкідливих домішок забезпечують підвищену рівномірність розподілу хімічних елементів по перетину поковок, високу однорідність сірчаних відбитків, низький вміст неметалевих включень і газів.

Практичне значення:

1. Розроблено та здійснено оригінальна технологічна схема виробництва злитків масою до 50 т з розливанням у аргоновій камері. Застосування сталі з вмістом кремнію $<0,1\%$ і строго дозоване розкислення алюмінієм дозволили отримати метал з дуже високим рівнем фізико-механічних характеристик, включаючи в'язкість руйнування і опір крихкому руйнуванню.

У загальній частині надано загальні відомості про шарикопідшипникові сталі; наведено призначення, види і сфера застосування шарикопідшипникової сталі; проаналізований хімічний склад шарикопідшипникової сталі; розглянута загальна характеристика способів виплавки, позапічної обробки та розливання шарикопідшипникової сталі.

У розділі «Аналіз електросталеплавильних способів виробництва шарикопідшипникової сталі» представлений аналіз електросталеплавильних способів виробництва шарикопідшипникової сталі.

У «Технологічній частині» проведені дослідження виплавки шарикопідшипникової електросталі без кремнію, приведений баланс кремнію і забезпечення його заданого вмісту в безперервнолитої автолистової сталі та досліджена поведінка кремнію в системі шлак-метал при позапічної обробці автолистової сталі на УКП.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» проаналізовано основні проблеми охорони праці та техногенної безпеки в умовах проведення досліджень в умовах електросталеплавильного цеху.

Розроблена технологія рекомендується для дослідно-промислових випробувань в електросталеплавильних та киснево-конвертерних цехах України.

Зміст

Вступ.....	9
1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Призначення, види і сфера застосування шарикопідшипникової сталі	10
1.2 Хімічний склад шарикопідшипникової сталі	11
1.3 Загальна характеристика способів виплавки шарикопідшипникової сталі.....	16
1.4 Аналітичний огляд літератури з питань технології, способів виплавки і розливання шарикопідшипникової сталі за останні роки.....	17
1.5 Вибір і рекомендації по використанню нових прогресивних розробок в технології виплавки шарикопідшипникових сталей.....	18
1.6 Загальний стан процесу вакуумування сталі.....	21
2. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ СПОСОБІВ ВИРОБНИЦТВА ШАРИКОПІДШИПНИКОВОЇ СТАЛІ	25
2.1 Вимоги, що пред'являються до шарикопідшипникової сталі.....	25
2.2 Основні положення класичної технології виплавки шарикопідшипникової сталі.....	29
2.3 Проблема отримання сталі з невеликим вмістом неметалічних включень	31
3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	38
3.1 Баланс кремнію і забезпечення його заданого вмісту в безперервнолитої автолистової сталі	53
3.2 Дослідження поведінки кремнію в системі шлак-метал при позапічної обробці автолистової сталі на УКП.....	61
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА	68
4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників у сталеплавильній лабораторії електросталеплавильного цеху	68
4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища	70
4.3 Заходи з електробезпеки.....	71
4.4 Заходи пожежної безпеки.....	72
4.5. Технічні рішення виробничої санітарії	74

4.5.1. Опалення та вентиляція цеху	74
4.5.2 Освітлення виробничих приміщень	75
4.5.3 Санітарно - побутові приміщення	76
4.5.4 Виробничий шум	77
4.5.5 Засоби індивідуального захисту	78
Висновки	79
Перелік джерел посилання	80
Додаток А Публікації за темою кваліфікаційної роботи	82

ВСТУП

Сучасний етап розвитку вітчизняної металургійної промисловості характеризується вдосконаленням технологічних процесів з метою підвищення якості та розширення сортаменту металопродукції відповідно до вимог ринкової економіки.

Однак функціонування існуючих процесів потребує постійних досліджень та вдосконалення.

Однією з характеристик деяких сталей (особливо автомобільної сталі та сталі для шарикопідшипників) є те, що кремній є шкідливою домішкою. Забезпечення високої пластичності, що дозволяє здійснювати глибоке волочіння без утворення дефектів (зламів, тріщин) під час холодної прокатки, є основним викликом для виробників сталі і водночас головною вимогою до якості таких металів. Межа текучості сталі залежить від вмісту домішок, особливо кремнію, який не повинен перевищувати 0,02-0,03%.

Доведено, що зниження вмісту кремнію в конструкційних сталях і вакуумне розкислення вуглецю мають значний позитивний вплив на процеси дегазації рідкого металу, розподіл домішок і формування основної кристалічної структури при затвердінні. Ці процеси є найбільш ефективними під час кристалізації великих металевих злитків, що призводить до підвищення пластичності металу та зменшення схильності до крихкого руйнування.

Можна зробити висновок, що безкремнієві сталі також є перспективними для виробництва зливків і слябів УБРС, особливо для виготовлення виробів відповідального і довготривалого застосування.

1. ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Призначення, види і сфера застосування шарикопідшипникової сталі

Як випливає з назви, шарикопідшипникові сталі в основному використовуються для виготовлення кульок, роликів і кілець підшипників [2]. Однак спектр марок сталі цього типу дуже широкий. Це пов'язано з різноманітністю вимог до експлуатаційних характеристик підшипників, починаючи від традиційних і закінчуючи новими галузями промисловості та сільського господарства.

Найбільш поширені високовуглецеві сталі для підшипників можна класифікувати наступним чином:

- підшипникові сталі, що використовуються в нормальних умовах (хромисті, хромисті з молібденом, хромомарганцево-кремнієві, хромомарганцеві з молібденом);

- підшипникові сталі, що застосовуються у важких умовах експлуатації та при високих температурах (корозійностійкі та жароміцні сталі) [1].

До першої групи належать сталі марок ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, ШХ4, ШХ6 та ШХ9 [3]. В результаті уніфікації останні дві марки були замінені на ШХ15. Аналогічні марки сталі в інших країнах називаються 52100, 100С6, SKF-24, SUJ2 тощо.

До другої групи належать сталі марок 95Х18Ш ("Ш" вказує на те, що вона виплавлена методом електрошлакового переплаву, тоді як вакуумно-дуговий переплав електрошлакової сталі позначається "ШД"), 11Х18М-ШД, ЕІ760, ЕІ347 (8Х4В9Ф2), 8Х4М4ВФ1-Ш, 8ДЦВ40 М50, Z80WDCV6, 80МоCrV4216 та ін.

Крім перерахованих вище, широко застосовуються також низьковуглецеві карбідо-вольфрамкові сталі, а сплави з особливими фізичними властивостями використовуються в обмеженій мірі. Вибір сталі для конкретного підшипника залежить від його розмірів і умов експлуатації.

Для підшипників, що працюють в діапазоні температур 60-300°C, використовують хромисту сталь і хромомарганцевокремнієву сталь. При температурі вище 100°C для забезпечення стабільності розмірів деталі повинні пройти спеціаль-

ну термічну обробку, яка знижує твердість, а також опірність сталі до контактної втоми.

У зазначеному діапазоні температур вибір хромової або хромомарганцево-кремнієвої сталі визначається товщиною стінки кільця або діаметром тіл кочення (кремній і марганець підвищують загартовуваність сталі, тому вміст цих елементів збільшується зі збільшенням товщини виробу). Для забезпечення прогартовуваності кілець підшипників з товщиною стінок понад 10 мм і тіл кочення діаметром понад 22 мм сталь ШХ15 замінюють на сталь ШХ15СГ. Для кілець з товщиною стінки понад 30 мм для великих деталей підшипників на внутрішньому ринку використовується сталь ШХ20СГ; граничні розміри деталей, в яких може використовуватися сталь ШХ20СГ або подібна до неї, відрізняються в різних країнах. Це можна пояснити відмінностями в прогартовуваності через особливості технології виплавки сталі та відмінностями в схемах, що використовуються для визначення товщини стінки кільця.

У зв'язку з впровадженням поверхневого зміцнення при глибокому індукційному нагріві - передового методу термічної обробки деталей залізничних підшипників - компанія розробила сталь ШХ4 з контрольованою прогартовуваністю. Її склад відрізняється від сталі ШХ15 тим, що містить менше елементів, таких як марганець, кремній і хром, які впливають на загартовуваність сталі [5].

Крім підшипникових деталей, сталь ШХ15 використовується, наприклад, у виробництві деталей, що вимагають високої твердості і хорошої зносостійкості, таких як голки розпилювачів інжекторів, зворотні клапани, подушки впорскування, ролики паливних насосів, ролики і різні осі важелів [4].

1.2 Хімічний склад шарикопідшипникової сталі

Шарикопідшипникові сталі класифікуються як інструментальні за своїм складом і властивостями, але є конструкційними сталями спеціального призначення через їх застосування [2].

У таблиці 1.1 наведено хімічний склад деяких марок шарикопідшипникових сталей: хромистих, хромомарганцевокремнієвих та корозійностійких.

Таблиця 1.1 - Хімічний склад деяких марок шарикопідшипникової сталі

країна	марка сталі	C	Si	Mn	Cr	P*	S*	Ni*	Cu	Mo
звичайна хромиста сталь (в т.ч. з молібденом)										
Україна	ШХ15	0,95-1,05	0,17...0,37	0,20...0,40	1,30...1,65	0,027	0,020	0,30	0,25	-
Україна	ШХ4	0,95-1,05	0,15...0,30	0,15...0,30	0,35...0,50	0,027	0,020	0,30	0,25	-
Швеція	SKF-24	~1,0	~0,30	~0,30	~1,8	0,025	0,020	-	-	≤0,20
США	52100	0,98...1,1	0,15...0,30	0,25-0,45	1,3...1,6	0,025	0,025	0,25	0,35	≤0,10
Німеччина	100Cr6	0,90...1,0 5	≤0,35	≤0,40	1,4...1,65	0,030	0,025	-	-	-
Японія	SUJ2	0,95...1,1	0,15-0,35	≤0,50	1,3...1,6	0,025	0,025	0,25	0,25	-
хромомарганцевокремниста і хромомарганцева з Мо										
РФ	ШХ15СГ	0,95...1,0 5	0,40...0,65	0,9-1,2	1,3...1,65	0,027	0,020	0,30	0,25	-
РФ	ШХ20СГ	0,90...1,0	0,55...0,85	1,4-1,7	1,4...1,7	0,027	0,020	0,30	0,25	-
США	52100Grade2	0,85...1,0	0,50...0,80	1,4-1,7	1,4...1,8	0,025	0,025	0,25	0,35	≤0,06
Швеція	SKF-27	~1,0	~0,50	~0,80	~1,95	0,025	0,020	-	-	~0,45
Німеччина	100CrMn6	0,9-1,05	≤0,70	≤1,20	1,40...1,65	0,030	0,025	-	-	0,10...0,25
Японія	SUJ5	0,95...1,1	0,40...0,70	0,90...1,15	0,9...1,2	0,025	0,025	0,25	0,25	0,10...0,25
корозійностійка										
Україна	95X18-III	0,9...1,0	0,8	≤0,70	17,0...19,0	0,030	0,025	0,30	0,25	-
Україна	11X18M-IIIД	1,10...1,2	0,53...0,93	0,50...1,0	16,5...18,0	0,025	0,015	0,30	0,3	0,50...0,80
США	440С	0,95...1,2	≤1,00	≤1,0	16,0...18,0	0,030	0,030	-	0,25	≤0,75
Франція	100CD17	0,95...1,1	≤1,00	≤1,0	16,0...18,0	0,030	0,025	-	-	0,40...0,60
Німеччина	X90CrMoV18	0,85...0,9 5	≤1,00	≤1,0	17,0...19,0	0,045	0,030	-	-	1,00...1,30
Японія	SUS57В	0,95...1,2	≤1,00	≤1,0	16,0...18,0	-	-	-	-	≤0,75

* - не більше

У багатьох країнах проблема недостатньої загартовуваності та жаростійкості виробів з хромистих і хромомарганцево-силікатних сталей була вирішена шляхом розробки модифікованих сталей з невеликими добавками молібдену, ванадію (німецькі компанії виробляють марку сталі X90CrMoV18, яка містить ванадій) і вольфраму. Ця сталь використовується в деяких країнах.

У деяких країнах було розроблено кілька модифікацій підшипникової сталі для компенсації зменшення вмісту хрому шляхом додавання невеликих кількостей молібдену з високим вмістом марганцю з метою економії імпортованого хрому [1].

Високий вміст вуглецю в шарикопідшипникових сталях визначає їх високу міцність і зносостійкість після термічної обробки. Поверхнева твердість визначає

ється концентрацією вуглецю в мартенситі, яка однакова для всіх шарикопідшипникових сталей.

Твердість внутрішнього шару металу залежить від глибини загартування, яка, в свою чергу, залежить від вмісту хрому. Чим більша деталь підшипника, тим вищий вміст хрому (0,4-1,65%), оскільки хром затримує перехід від аустеніту до перліту і підвищує загартовуваність сталі.

Крім того, висока твердість карбідів хрому підвищує зносостійкість сталі. Хром покращує стійкість мартенситу до відпуску, зменшує схильність сталі до перегріву і надає дрібнозернисту структуру. Однак при високому вмісті хрому (понад 1,65%) важко отримати однорідну мікроструктуру, тому вміст хрому в шарикопідшипникових сталях зазвичай не перевищує 1,65%.

Марганець, як і хром, підвищує твердість і зносостійкість сталі. У той же час, він сприяє зростанню зерна при нагріванні, що може огрубити мікроструктуру сталі, перегрітої під час термічної обробки. Кремній негативно впливає на в'язкість шарикопідшипникових сталей. Однак, оскільки марганець і кремній є розкислювачами і чим вищий їх вміст, тим повніше розкислюється сталь, бажано, щоб вміст цих елементів не перевищував 0,35% Si і 0,4% Mn у всіх марках шарикопідшипникової сталі. Виняток становлять сталі, що використовуються для великих компонентів підшипників, такі як ШХ15СГ. Високий вміст марганцю і кремнію в цій сталі пояснюється тим, що ці елементи знижують критичну швидкість загартування і схильність сталі до викривлення і розтріскування під час загартування.

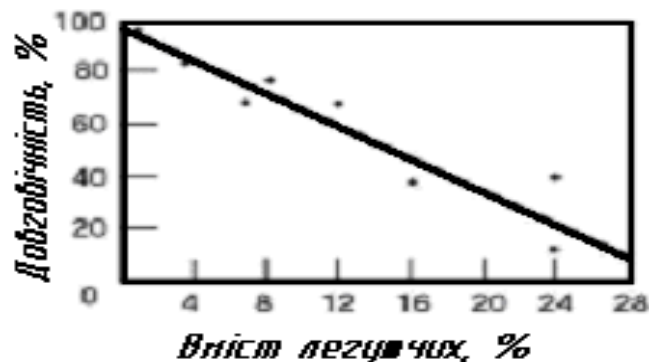


Рисунок 1.1 – Вплив сумарного вмісту легуючих елементів на довговічність підшипникових сталей

Збільшення кількості легуючих елементів понад 5% може бути виправданим лише за особливих умов експлуатації (наприклад, корозійне середовище, високі робочі температури), оскільки це призводить до збільшення витрат на обробку та зниження довговічності порівняно з аналогічним показником для звичайних підшипникових сталей (рис. 1.1).

Зміна вмісту легуючих елементів має різний вплив на властивості підшипників. Додавання молібдену позитивно впливає на термін служби підшипників.

В Японії були випробувані підшипникові сталі типу ШХ15 з вмістом Si 1,1,5%. Довговічність підшипників, виготовлених з цих сталей, була покращена, але вони не були використані через погану оброблюваність.

Заміна запропонованої сталі ШХ15 на сталь з низьким вмістом хрому (85Cr1Mo) не була проведена через її низьку прогартовуваність (8 мм), незважаючи на короткий час відпалу. Ця сталь найкраще підходить там, де потрібна покращена холодна деформація.

В даний час сталі, вироблені методами ЕШП і ВДП, максимально задовольняють вимогам щодо вмісту шкідливих включень. Однак метал занадто дорогий і, крім того, не існує економічно обґрунтованих вимог до чистоти металу.

До шкідливих для шарикопідшипникових сталей елементів відносяться фосфор, мідь, нікель, кисень, водень, азот, олово, свинець і миш'як.

Фосфор збільшує схильність сталі до утворення грубозернистої структури при нагріванні, підвищує крихкість, знижує міцність на вигин і, таким чином, підвищує сприйнятливність сталі до динамічних навантажень і збільшує сприйнятливність виробу до розтріскування при загартуванні. З цієї причини вміст фосфору в металах обмежений.

Мідь підвищує твердість, міцність на розрив і прогартовуваність сталі, але є небажаною домішкою, оскільки підвищений вміст міді під час гарячої обробки збільшує схильність до поверхневого розтріскування і розшарування.

Вміст нікелю обмежений, оскільки він знижує твердість сталі.

Олово, свинець, миш'як і азот знижують стійкість сталі до відколів.

Водень негативно впливає на якість сталі, оскільки його розчинність знижується при низьких температурах металу, що призводить до підвищення локального тиску в металі та утворення флокенів.

Сірка має різний вплив на властивості шарикопідшипникових сталей. Негативний вплив проявляється у зниженні зносостійкості та втомному руйнуванні, коли сульфід виділяється на оброблювану поверхню. Однак, коли навколо сульфідних включень утворюється сульфідна оболонка з достатнім вмістом сірки, вплив цих включень на концентрацію напружень зменшується і, отже, опір втомі підвищується. Термін служби підшипника збільшується, коли співвідношення S/O збільшується до 3,5. Цьому також сприяє покращення якості поверхні завдяки тому, що сірка покращує оброблюваність сталі [2].

Деякі автори показали, що збільшення вмісту сірки (до 0,15%) позитивно впливає на довговічність і оброблюваність підшипникових сталей, але сталі з таким вмістом сірки ще не використовувалися.

Окремо слід вказати на вплив кисню на властивості шарикопідшипникових сталей. Загалом вплив кисню на властивості підшипникових сталей проявляється через неметалеві включення, утворені киснем, а також інші статичні властивості сталі. Неметалеві включення в підшипникових сталях є факторами концентрації напружень і в деяких випадках можуть викликати мікротріщини, що утворюються внаслідок підвищеної мозаїчної концентрації напружень, швидкого охолодження під час гартування тощо [6]. Коли неметалеві включення проникають в поверхню або підшар, вони можуть руйнуватися або фарбуватися, утворюючи місця зародження тріщин при навантаженні. Оскільки ймовірність руйнування включення залежить від його деформативності, в цьому типі сталі слід уникати крихких включень, таких як корунд, які не піддаються деформації, утворюючи більш пластичні частинки, такі як силікати (при однаковому вмісті кисню підшипники, виготовлені з кислотної електросталі, в 2,5 рази довговічніші, ніж підшипники, виготовлені з електротехнічної сталі, яка має вище).

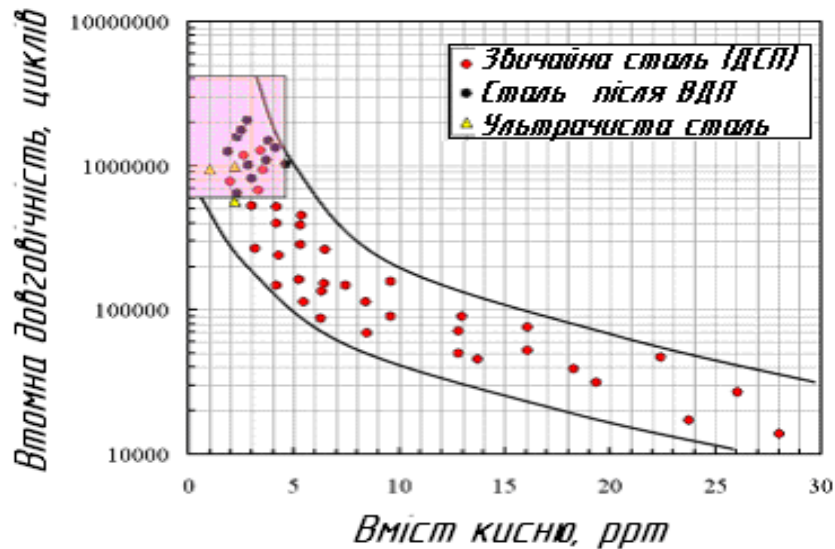


Рисунок 1.2 – Вплив кисню на втомну довговічність підшипникової сталі [13]

Загальна кількість неметалевих частинок і їх розмір повинні бути мінімальними (оскільки кількість включень тісно корелює з вмістом кисню, вміст цього елемента також повинен бути мінімальним), а їх форма - сферичною, оскільки від їх кількості, розміру і форми залежить можливість проникнення включень в поверхневий шар металу. Наявність в сталі великої кількості великих включень катастрофічно знизить довговічність сталі: оксиди розміром більше 30 мкм збільшаться в 10, а то і в 100 разів. Чим вищі твердість і модуль пружності включень, тим більша концентрація напружень на включеннях і, відповідно, нижча контактна міцність.

Підшипникові сталі, вироблені за традиційною технологією, містять приблизно 0,005% O_2 , 0,01-0,02% N_2 і 0,0001-0,0005% H_2 . Кисень знаходиться у вигляді оксидів, кількість яких залежить від методу розкислення. При обробці у вакуумі вміст кисню зменшується до 0,002%, а при ВДП - до 0,001%. Можливість зменшення вмісту кисню показана на рисунку 1.2.

1.3 Загальна характеристика способів виплавки шарикопідшипникової сталі

Як згадувалося вище, шарикопідшипникова сталь є одним з матеріалів, що використовуються у виробі з контактними поверхнями, поряд зі сталлю для валків, рейок і залізничних коліс. Для цього типу виробів дуже важливо, щоб поверх-

ня і нижні шари не містили твердих включень, що не деформуються. Коли на такі включення чиниться тиск, вони руйнуються, забарвлюються і з часом стають ядром тріщин, що в кінцевому підсумку призводить до виходу виробу з ладу. До таких небажаних включень належать, зокрема, Al_2O_3 , CaO і MgO . Силікати (оксиди на основі SiO_2) підходять для цього типу виробів, оскільки вони більш пластичні, ніж раніше згадані типи включень. Тому шарикопідшипники, виготовлені зі сталі, виплавленої в кислотних печах (мартенівські та дугові печі), є більш стійкими, ніж підшипники, виготовлені зі сталі, виплавленої в основних печах. Це пов'язано зі зміною складу включень при переході від основної до кислотної виплавки.

У країнах СНД майже 90% підшипникової сталі масового виробництва в даний час виплавляється в електродугових печах і близько 10% - в кислих мартенівських печах.

Як в електродугових, так і в кислих печах можлива обробка ковша синтетичним вапняно-глиноземним шлаком.

Іншим напрямком підвищення якості вітчизняної підшипникової сталі є рафінування та переплавлення, наприклад, вакуумно-дуговий, електрошлаковий, плазмовий та електронно-променевий способи. Рафінування та переплавлення є високоефективними. Фундаментальні зміни в процесі кристалізації сталі дозволили підвищити щільність злитка, знизити загальний вміст газів, домішок і неметалевих включень, а також зменшити розмір останніх у зливку.

Важливими тенденціями у виробництві сталі у відкритих дугових електропечах є використання позапічного вакууму в ковші, систем циркуляційного або періодичного вакууму, а також вакуумного шлакоутворення.

1.4 Аналітичний огляд літератури з питань технології, способів виплавки і розливання шарикопідшипникової сталі за останні роки

Підшипникові сталі виплавляють з початку 20-го століття (перша виплавка - ШХ15, яка і зараз широко використовується) і за цей час з метою виявлення закономірностей впливу хімічного складу, вмісту і типу неметалевих включень, мікро- і макроструктури, а також з'ясування того, що якість готового підшипника зале-

жить від способу його виготовлення У цій галузі було проведено велику кількість досліджень та експериментів з метою

Серед металургів і фахівців підшипникової галузі немає єдиної думки щодо частки впливу технічних, конструктивних і металургійних факторів на довговічність підшипників. Це пов'язано з тим, що в більшості досліджень питання підвищення якості підшипникової сталі розглядається переважно з точки зору виконання вимог існуючих стандартів і недостатньо вивчається взаємозв'язок між цими вимогами і довговічністю підшипників. Така розбіжність поглядів пояснюється тим, що випробування підшипників є багатофакторним експериментом і дуже важко виділити вплив одного з факторів, що беруть участь [8].

Аналіз результатів випробувань підшипників дозволяє зробити висновок, що вплив конструктивних параметрів і технологічних факторів (якість поверхні, точність складання, огранювання ротора і т.д.) набагато більший, ніж вплив металургійної якості металу, в тому числі характеру і кількості неметалевих включень.

На думку А.Кrawczyk (Польща), основним критерієм оцінки якості підшипникових матеріалів є втомна контактна міцність, яка відображає стійкість матеріалу до утворення поверхневих пітінгів на обробленій поверхні підшипника. Механізм цих явищ руйнування є предметом суперечливих гіпотез.

Щодо того, чому відбувається втомне зношування у випадку втоми від обертання, то, як і при інших видах втомної міцності, негативний вплив мають різного роду неоднорідності та розриви в матеріалі, які діють як концентратори напружень, викликаючи їх нерівномірний розподіл в суміжних мікрообластях і прискорюючи руйнування матеріалу [9]. Іншими словами, він вважає, що якість металу, з якого виготовлений підшипник, має більше значення.

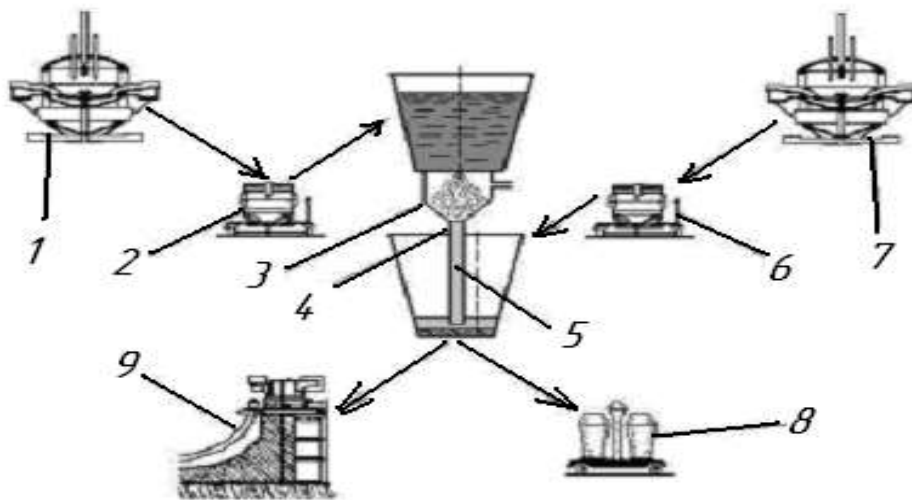
1.5 Вибір і рекомендації по використанню нових прогресивних розробок в технології виплавки шарикопідшипникових сталей

Попит на якість сталі продовжує зростати, хоча б за рахунок виробництва металів з низьким вмістом сірки, кисню, водню і неметалевих включень Тільки процес ASEA-SKF (названий на честь двох шведських компаній, які його розро-

били) дозволяє комплексно рафінувати сталь, але це дуже дорогий і тривалий процес. Це дуже дорогий і тривалий процес.

УкрНДІспецсталь у співпраці з Дніпроспецсталлю та іншими організаціями розробила метод і обладнання для вакуумної обробки сталі, що одночасно обробляє її в колоні синтетичного шлаку (УВСШ). Цей метод поєднує в собі переваги вакуумної обробки та обробки в синтетичному шлаку при відносно низькій вартості і дозволяє проводити широкомасштабну вакуумну обробку сталі.

Метал, виплавлений у сталеплавильному агрегаті, вакуумується струменями, а потім переробляється в шлак зверху через шлакоплавильну вежу висотою 3 м. Шлакова вежа утворюється за рахунок різниці між атмосферним тиском і залишковим тиском у вакуумній камері. Кількість шлаку визначається висотою і перерізом стовпа шлаку, а також атмосферним тиском. Схема виплавки металу методом вакуумного шлакування показана на рисунку 1.3.



1 - сталеплавильна піч, 2 - передавальний ківш з початковим металом, 3 - вакуумна камера, 4 - шлаковий рукав, 5 - стовп рідкого шлаку, 6 - приймальний ківш з синтетичним шлаком, 7 - шлакоплавильна піч, 8 - виливниці, 9 – МБЛЗ

Рисунок 1.3 – Схема способу вакуумування з обробкою в стовпі шлаку

За цим методом метал зі сталеплавильного агрегату потрапляє в перевантажувальний ківш, приєднаний до вакуумної камери, після чого ініціюється донне розвантаження з дегазацією металу в струмені.

Розпилений метал стікає на дно вакуумної камери, потрапляє в шлаковий шланг, заповнений шлаком, і очищається через шар шлаку. Шлак подається у ва-

куумну камеру з шлакового ковша шлакоплавильної печі. Нижче шлакового рукава розташований приймальний ківш, з якого метал подається безпосередньо в розливу, або в литникову машину, або, що більш переважно, в машину безперервного лиття заготовок.

Як показали дослідження, метод вакуумування з одночасною обробкою в шлаковій колоні має ряд кінематичних переваг перед іншими методами обробки. Наприклад, при вакуумуванні одночасно з дегазацією спостерігається стікання струменів у вигляді плівок, крапель або невеликих струменів металу вздовж стінок і конічної основи вакуумної камери, що підвищує ефективність процесу дегазації. При русі металу через шлаковий стовп утворюється шлаково-металева емульсія, причому дисперсна фаза металу має розмір частинок в діапазоні 0,05-1,0 см і максимальну масу крапель у фракції 0,3-0,6 см.

Поверхня контакту між металом і шлаком при обробці в шлаковому стовпі становить понад 300 м² на тонну сталі, що значно перевищує аналогічний показник при обробці синтетичним шлаком в ковші.

Обробку в шлаковому стовпі можна описати як протитечійну взаємодію фаз, коли швидкість однієї фази (в даному випадку шлаку) близька до нуля. Тому ефективність видалення розчинних домішок з металу при обробці в шлаковому стовпі вища, ніж при звичайному перемішуванні фаз в об'ємі (наприклад, при обробці синтетичним шлаком в ковші). Ефективність виплавки також підвищується за рахунок того, що домішки з шлаку з меншою ймовірністю знову потрапляють в метал, оскільки метал не контактує із забрудненим шлаком після обробки.

На заводі "Дніпроспецсталь" обробляли підшипникову сталь. Сталь виплавляли в 60 печах шляхом переплавлення відходів з продувкою киснем. Шлак не розкислювався в процесі обробки і не видалявся з печі перед випуском металу. У всіх експериментах і аналізах розплаву були отримані хороші результати [10].

Коротше кажучи, слід взяти всіх необхідних заходів для забезпечення швидкого та ефективного впровадження цієї технології, щоб великі українські компанії могли успішно конкурувати з іноземними металургійними компаніями, такими як ASEA-SKF.

1.6 Загальний стан процесу вакуумування сталі

Суть цього процесу полягає у зменшенні зовнішнього тиску на метал з метою зміщення рівноваги залежної від тиску реакції рафінування металу.

Підвищення якості при вакуумуванні досягається за рахунок наступних процесів:

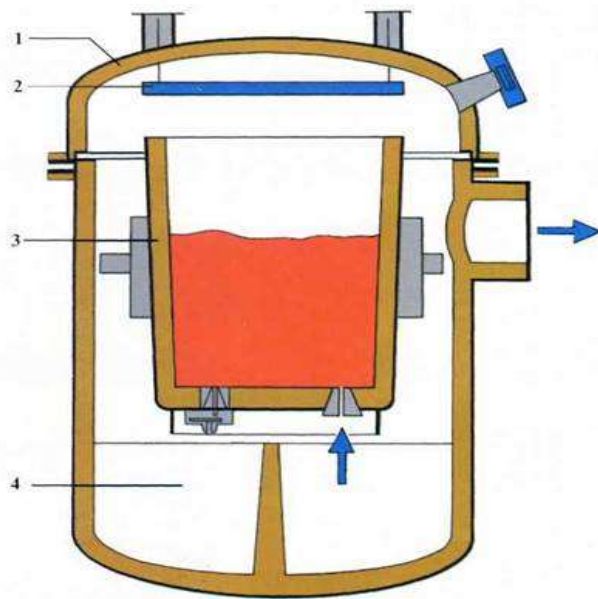
1. дегазация металу шляхом зменшення концентрації водню та азоту в сталі
2. вакуумне розкислення сталі за рахунок збільшення розкислювальної здатності вуглецю. Крім того, сталь можна глибоко зневуглицювати, використовуючи зміни в рівновазі реакції окислення вуглецю.
3. зменшення вмісту неметалевих включень в металі шляхом змішування і часткового відновлення неметалевих включень вуглецем.
4. часткове очищення від небажаних домішок кольорових металів шляхом випаровування летких домішок (цинк, свинець, сурма, олово).

З точки зору конструктивних і технічних особливостей, для вакуумної обробки сталі можуть бути використані наступні методи:

1. вакуумування в ковші
2. вакуумування в потоці
3. періодичне вакуумування
4. циркуляційний вакуум.

Вакуумування в ковші (рис. 1.4) є відносно технічно простим і відносно дешевим методом. Він полягає в тому, що сталерозливний ківш з металом поміщають у вакуумну камеру, закривають кришку і знижують зовнішній тиск за допомогою системи вакуумних насосів.

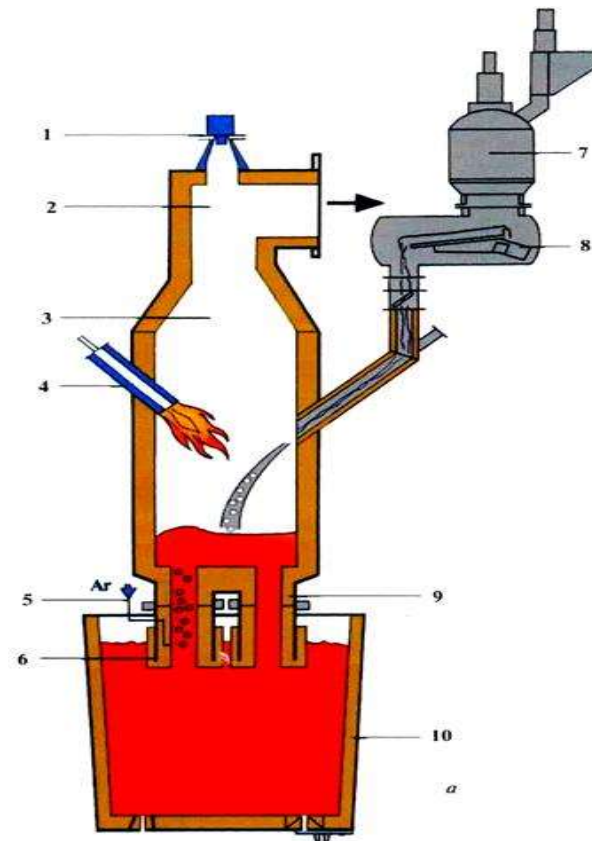
Поточний вакуум може бути реалізований як для переливання з ковша в інший ківш, розташований у вакуумній камері, так і для вакуумного лиття великих злитків (50 тонн і більше) за допомогою виливниць у вакуумній камері. Особливо слід відзначити опцію вбудованого вакууму при розливанні сталі на машині безперервного лиття заготовок.



1 - вакуум-кришка; 2 - теплозахисний екран;
3 - сталерозливний ківш; 4 - вакуум-камера

Рисунок 1.4 – Установка для вакуумної обробки металу в ковші

Схожість між періодичним і рециркуляційним методами вакуумування полягає в тому, що за один раз вакуумується тільки частина металу, яка всмоктується з ковша в спеціальну вакуумну камеру. Різниця між цими двома методами полягає в способі обміну металом між ковшем і вакуумною камерою. При періодичному вакуумуванні (процес ДН) вакуумна камера має одне сопло, і частина металу, що вакуумується, оновлюється шляхом переміщення вакуумної камери "вгору-вниз". При рециркуляційному вакуумному витягуванні (процес РН, рис. 1.5) вакуумна камера має два сопла: одне для металу, що надходить у вакуум (сопло подачі), і одне для металу, що виводиться з вакууму (сопло вивантаження). Для забезпечення циркуляції металу інертний газ подається від металу до вхідного сопла після того, як сопло опускається в ківш.

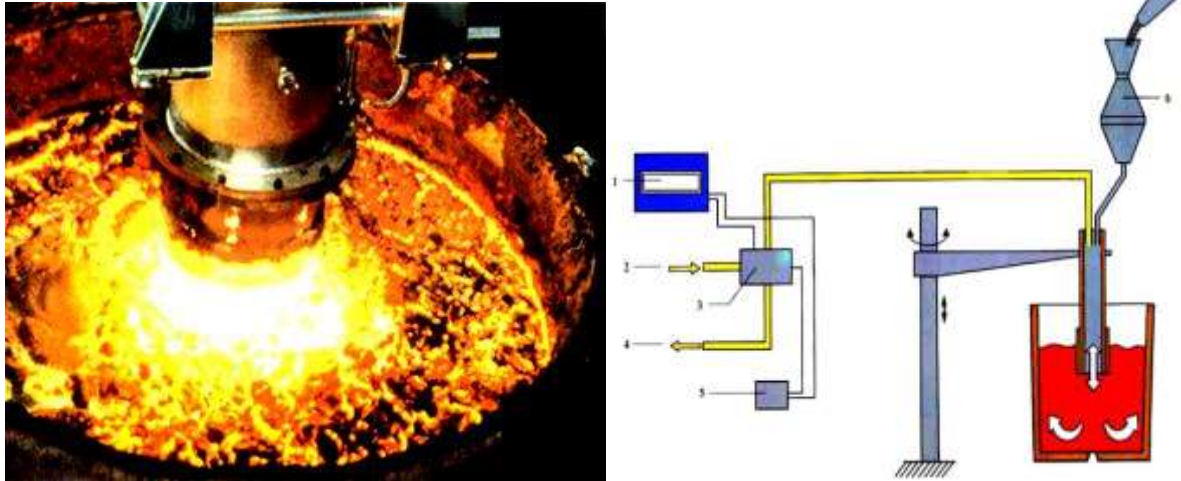


1 - промислова телевізійна камера; 2 - підключення вакууму; 3 - камера RH;
 4 - підігрів камери; 5 - патрубок для підведення транспортуючого газу;
 6 - погрузна трубка на вході; 7 - шлюзовий пристрій для введення в камеру легуючих добавок; 8 - лотковий дозатор у вакуум-щільному кожусі;
 9 - погрузна трубка на виході; 10 - сталерозливний ківш

Рисунок 1.5 – Схема RH - процесу (циркуляційного вакуумування)

Утворений "газовий ліфт" допомагає новим шматкам металу з ковша потрапляти у вакуум, а надлишковий гідростатичний тиск допомагає відповідній кількості металу витікати з вакууму назад у ківш через всмоктувальну трубу.

Методи вакуумної обробки сталі постійно вдосконалюються і пропонуються нові рішення, які дозволяють виробляти високоякісний метал більш простим способом. Одним із прикладів є процес РМ (рис. 1.6).



1 - пункт управління; 2 - надмірний тиск N_2 ; 3 - клапанна станція; 4 - вакуум;
5 - гідравлічна система; 6 - бункер для легуючих добавок

Рисунок 1.6 – Загальний вигляд і схема РМ-процесу

Метод заснований на подачі аргону і змінному вмиканні/вимиканні вакуумного насоса, що забезпечує інтенсивну пульсацію металу в циліндрі і ковші та високий ступінь рафінування. Перевагою цієї системи є те, що вона не вимагає глибокого вакууму і дозволяє працювати високоефективно.

Таким чином, проаналізувавши зібраний матеріал, можна зробити висновок, що сучасне виробництво шарикопідшипникової сталі вимагає розробки і вдосконалення ефективної технології, одним з елементів якої повинна стати технологія виробництва сталі з мінімальним вмістом кремнію.

2. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ СПОСОБІВ ВИРОБНИЦТВА ШАРИКОПІДШИПНИКОВОЇ СТАЛІ

2.1 Вимоги, що пред'являються до шарикопідшипникової сталі

Шарикопідшипникові сталі, що використовуються для виготовлення кульок, роликів і кілець, повинні мати високу твердість, зносостійкість, достатню пружність для забезпечення надійної роботи підшипника при динамічних навантаженнях і втомну міцність для роботи при змінних навантаженнях [1].

Руйнування деталей підшипника відбувається під впливом високих напружень. Тому однорідність металу, яка гарантує довготривалу однорідність механічних властивостей, є ключовою вимогою до підшипникових сталей. Однорідність металу включає в себе

- а) Мінімальне відхилення від середнього хімічного складу;
- б) однорідність металографічної структури
- в) достатню чистоту неметалевих включень.

У вітчизняному машинобудуванні для виготовлення підшипників найчастіше використовують леговані хромом високовуглецеві сталі та хромокремнієво-марганцеві сталі (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Хімічний склад шарикопідшипникової сталі, %

Марка сталі	С	Mn	Si	Cr	S	P
					не більше	
ШХ6	1,05—1,15	0,2—0,4	0,15—0,35	0,40—0,70	0,020	0,027
ШХ9	1,00—1,10	0,2—0,4	0,15—0,35	0,90—1,20	0,020	0,027
ШХ15	0,95—1,10	0,2—0,4	0,15—0,35	1,30—1,65	0,020	0,027
ШХ15СГ	0,95—1,10	0,9—1,2	0,40—0,65	1,30—1,65	0,020	0,027

Ці марки сталі мають високий вміст вуглецю і відмінну зносостійкість. Оскільки загартовуваність сталей зростає зі збільшенням вмісту хрому, марганцю і кремнію, сталі марок ШХ6 і ШХ9 використовуються тільки для невеликих підшипників.

В результаті досліджень умов експлуатації підшипників, режимів термічної обробки та поточних вимог виробництва, виробництво шарикопідшипникових сталей було переведено на одну марку сталі, ШХ15, замість трьох існуючих марок

[2]. Цей перехід на металургійних заводах, що постачають шарикопідшипникову сталь, вже завершено.

Вимога мінімізації відхилень від середнього хімічного складу шарикопідшипникових сталей обумовлена тим, що хімічна неоднорідність пов'язана з неоднорідністю їх мікроструктури і викликає складні проблеми під час термічної обробки і на наступних етапах виробництва підшипників. Також передбачається, що макроструктура металу вільна від дефектів і, зокрема, від тріщин, які можуть з'являтися у вигляді дрібних пор, знайдених в шарикопідшипникових стрижнях, сталях і готових підшипниках. Нарешті, основним показником якості шарикопідшипникової сталі є чистота неметалевих включень.

Наступні типи неметалевих включень спостерігаються в готовій сталі при виплавці в електродугових печах за класичною технологією [3].

1. сульфідні включення FeS-MnS, де переважає сульфід марганцю. Пластичні силікатне скло може змішуватися з сульфідами і, як і сульфіди, має витягнуту форму в металевих валках.

2. оксидні включення. При оцінці забруднення сталі оксидними включеннями останні можна розділити на дві групи, які по-різному впливають на термін служби підшипників

а) лінійні включення: глинозем Al_2O_3 або крихкі алюмосилікатні ланцюжки складного складу, що містять, крім Al_2O_3 і SiO_2 , MnO, CaO і FeO;

б) округлі включення зі складом, подібним до силікатів (глобули), які, як правило, не деформуються через високий вміст кремнезему.

У промислових умовах забрудненість шарикопідшипникових сталей оцінюють за допомогою звичайних шкал (стандарт).

На вітчизняних заводах для оцінки забрудненості сталі сульфідами та оксидами використовують чотириступеневу шкалу ГОСТ 801-78. Сталь оцінюють на наявність сферичних включень за шкалами ENDIPP або ЦНПЧМ. Вимоги до постачання високочистих шарикопідшипникових сталей призвели до перегляду старого ГОСТ 801-78.

Негативний вплив неметалевих включень в сталі зростає зі збільшенням вмісту вуглецю і пов'язаний зі зниженням пластичності високовуглецевих сталей,

що робить їх більш сприйнятливими до інтенсивних пошкоджень. Вплив розміру, форми і кількості неметалевих включень на довговічність шарикопідшипникових сталей неодноразово досліджувався на зразках для контактної витривалості і на готових підшипниках під час стендових випробувань [4, 5, 6].

Результати показують, що оксидні включення є найбільш небезпечними для стабільності компонентів підшипника.

У загартованих шарикопідшипникових сталях напруження концентруються навколо окремих частинок глинозему або крихкого алюмосилікату з неправильною або голкоподібною формою. Напруження, сконцентровані поблизу цих частинок, можуть досягати дуже високих значень і викликати руйнування навіть при відносно низьких прикладених навантаженнях.

На рис. 2.1 показано залежність значень контактної довговічності від розміру лінійних оксидних включень, оцінених у балах [5].

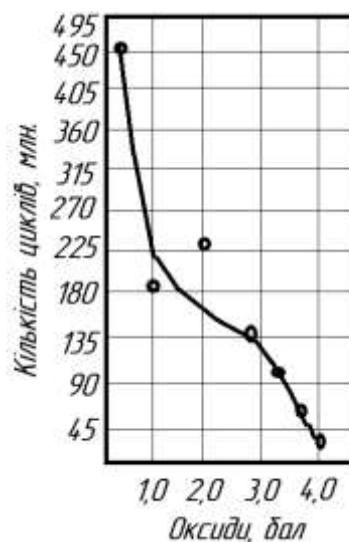


Рисунок 2.1 – Вплив оксидів на контактну витривалість

Непластичні глобулярні включення «розпушують» метал при прокатці [7]. Утворені мікроскопічні несплошності металу є осередками руйнування при роботі підшипників.

На рис. 2.2 приведена залежність величини контактної витривалості від розмірів глобулярних включень, виражених в мікронах [5].

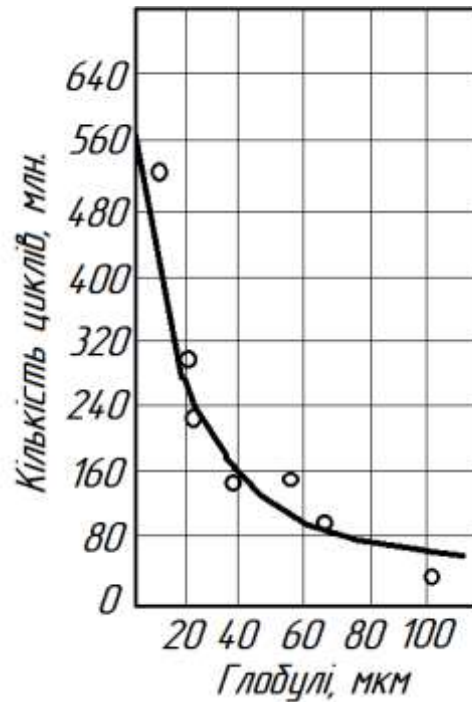


Рисунок 2.2 – Вплив глобулів на контактну витривалість

Зі збільшенням чистоти сталі збільшується вплив сферичних включень на стабільність підшипника. Сферичні включення небажані, оскільки вони зберігають свій розмір при деформації, а також тому, що великі сферичні включення (>15 мкм) можуть з'являтися на оброблюваній поверхні при виготовленні дрібних деталей (кульок, роликів, кілець).

Сульфідні включення впливають на зносостійкість сталі. Підвищений знос деталей призводить до скорочення терміну служби підшипників [6]. Під час прокатки сталі сульфіди є пластичними і тому витягуються, і в такому вигляді існує невеликий ризик виникнення високих напружень. Однак, коли сульфіди виходять на поверхню деталі, вони стають крихкими під час роботи підшипника і збільшують знос.

Характер, кількість і розмір неметалевих включень в шарикопідшипникових сталях визначаються технологією їх виплавки і лиття. Тому постійне вдосконалення технології виробництва цієї сталі на різних металургійних заводах спрямоване на підвищення її однорідності, зменшення хімічної та карбідної неоднорідності, збільшення щільності сталі і, що найголовніше, підвищення її чистоти з точки зору неметалевих включень.

2.2 Основні положення класичної технології виплавки шарикопідшипникової сталі

Шарикопідшипникову сталь або повністю окислюють в електродуговій печі, або переплавляють методом переплавлення відходів. В останньому випадку відсутній період активного окислення, а період відновлення однаковий для обох методів.

Метод плавки сталі з повним окисленням

В окислювальній плавці шихта складається з відходів вуглецевої сталі. Для підвищення вмісту вуглецю в шихті додають кокс або електродну шихту (іноді чавун) з таким розрахунком, щоб за період окислення вигоріло 0,3-0,4% С [3, 8, 9].

Для забезпечення раннього шлакоутворення в шихту додають вапно в кількості 1-2% від маси шихти, а вапно, флюорит, боксити або вогнетривку глину додають у ванну два-три рази під час плавки.

У сучасній технології виплавки шарикопідшипникової сталі періоди окислення і розчинення частково об'єднані, а залізна руда додається у ванну за 20-30 хвилин до повного розчинення у кількості 1-2% від маси шихти.

Після додавання всіх хвостотворювачів, ще до повного розплавлення шихти, необхідно ввести малорухомий окислювальний шлак для забезпечення активного кипіння ванни з невеликими кількостями окислення вуглецю. В останні роки для скорочення часу плавки і економії електроенергії ванну продувають киснем між плавленням і окисленням.

Концентрація марганцю у ванні в період окислення не регулюється. Однак деякі металурги вважають, що кремнезем більш інтенсивно флюсується оксидом марганцю, коли вміст марганцю у вихідній шихті високий [10].

На вітчизняних заводах період окислення закінчується, коли вміст вуглецю у ванні досягає 0,75-0,85%. До цього моменту температура металу повинна бути трохи вищою, ніж перед виплавою, - 1570-1590°C.

Метод плавки сталі переплавом відходів

При виплавці сталі методом переплавлення до шихти додається приблизно 80-90% брухту підшипникової сталі, решта - брухт конструкційної сталі. З цієї причини зазвичай немає необхідності в окисленні елементів. Після повного розплавлення і нагрівання ванни шлак прокочується. Період відновлення здійснюється так само, як і при окислювальній плавці.

Цей метод дозволяє скоротити час плавки, зменшити споживання енергії та повністю утилізувати легуючі елементи, що містяться у відходах. Однак переплавлення майже виключає процес кип'ятіння, який є найбільш ефективним засобом очищення ванни від газів і неметалевих включень.

У зв'язку з цим на шарикопідшипниковому сталеплавильному стані була проведена порівняльна оцінка забрудненості сталі, виплавленої як методом повного окислення, так і переплавом [11, 12]. На основі цього дослідження було встановлено, що сталі, отримані шляхом окислювальної виплавки, були менш забруднені оксидними включеннями і містили більше сульфідних включень, ніж сталі, отримані шляхом переплавлення.

Статистична обробка великої кількості даних про виплавку шарикопідшипникових сталей показала, що тонкі профілі (кола 14-24 мм) сталей, отриманих обома методами, мали однаковий вміст оксидів. Квадратний метал розміром 75 мм, отриманий окисленням, менш забруднений оксидами [7]. Тому вважається бажаним використовувати методи окислення для виробництва сталі при виробництві великих профілів [11].

Часткове окислення вважається необхідним для поліпшення якості сталі, отриманої шляхом переплавлення [3, 13].

Відновлювальний період

Метою відновлювального періоду є десульфуратія та розкислення сталі, а також видалення неметалевих включень. Ретельна відновлювальна плавка є необхідною умовою для отримання шарикопідшипникової сталі необхідної чистоти. Тому багато варіацій процесу плавки (послідовність розкислення і легування) пояснюються вдосконаленням технології на завершальній стадії плавки.

Період відновлення починається після завантаження окислювального шлаку. Сучасна технологія дозволяє деяке навуглецювання металу (0,10-0,15%) під

час підготовки ванни до відновлювального періоду. Після навуглецювання ванни додають шлакову суміш, що складається з вапна, плавикового шпату, вогнетривкої глини, бурового динаміту і карбідної суміші.

Замість осаджувального методу розкислення, який збільшує вміст неметалевих включень, проводять дифузійне розкислення карбідним шлаком протягом 40-60 хв (залежно від маси садки), після чого шлак перетворюється на білий шлак [14].

Після витримки ванни під карбідним шлаком дифузійне розкислення продовжують подрібненим 75% феросиліцієм, змішаним з вапном і флюоритом. Цю суміш додають до шлаку невеликими рівномірними порціями приблизно кожні 10 хвилин по всьому дзеркалу ванни, щоб звести до мінімуму випадання розкислювального осаду. З цією ж метою ванну перемішують перед додаванням нової суміші.

Експерименти показали, що ефективніше легувати хром на початку процесу рафінування, а не після витримки сталі під карбідним шлаком [3, 8, 12]. Цей прийом полегшує регулювання хімічного складу ванни, а також допомагає очистити її від включень оксиду хрому. Також встановлено, що подальше введення ферохрому в високовуглецеві марки сталі призводить до утворення карбідної смугастості в готовому прокаті [15]. Тому основна кількість ферохрому додається у ванну дуже рано в період відновлення і згодом компенсується додаванням меншої кількості ферохрому. Вміст вуглецевого сплаву в сталі можна регулювати додаванням відповідної марки ферохрому.

В даний час вміст карбіду кальцію в шлаку близько 2% вважається достатнім. Дослідження [16, 17] показали, що вищий вміст карбіду кальцію в останньому шлаку призводить до подальшого забруднення сталі. Тому, якщо вміст карбіду кальцію в шлаку становить близько 2% через 40 хвилин після додавання відновника і подрібненої коксової суміші, вважається, що до моменту випуску розплаву карбід кальцію зруйнований природним розчиненням [3]. Саме це робиться в сучасній технології поводження зі шлаком під час відновлювального періоду.

Для досягнення необхідної десульфурації сталі вміст СаО у вихідному зразку шлаку повинен становити не менше 55%. Достатня рідинна рухливість такого шлаку підтримується додаванням флюориту, шамоту та іноді динаміту.

Передумовою низького вмісту сірки в сталі є хороше розкислення відновленого шлаку. Якщо вміст оксиду заліза нижче 0,60%, вміст сірки в готовому металі незначний.

Дослідження також показало, що мінімальний вміст оксидів заліза в шлаку перед випуском розплаву сприяє підвищенню чистоти сталі за вмістом оксидів і сферичних включень [9, 10].

Згідно з вітчизняною заводською практикою, тривалість періоду відновлення не впливає на забрудненість сталі включеннями [10, 11, 14]. Однак було виявлено, що більш тривалий час відновлення (>3 годин) призводить до збільшення кількості зразків з високим вмістом включень. Оптимальний час відновлення становить 1 год. 40 хв. - 2 години. В даний час температура металу в печі перед випуском повинна бути в діапазоні 1560-1590 °С.

Випуск сталі з печі і розливка

Алюміній додають у ванну на стрижнях у кількості 0,3-0,4 кг/т за 2-3 хвилини до початку виплавки сталі. Плавка відбувається під білим або низькокарбідним шлаком (вміст СаС₂ <1%). Метал випускається повністю і змішується зі шлаком в ковші. Така організація вивантаження металу з печі захищає метал від окислення, шлак видаляє з металу певну кількість неметалевих включень і відбувається подальша десульфурація [7, 17, 19].

Після цього метал витримують у ковші протягом 10-15 хвилин перед розливанням. На вітчизняних заводах шарикопідшипникові сталі розливають виключно сифонним способом. Вибір способу розливання обумовлений високими вимогами до якості поверхні зливка.

Для досягнення найбільшої щільності зливка сталь розливають при досить високій температурі і вживають заходів для забезпечення достатнього підведення рідкого металу в осьовому напрямку зливка в процесі кристалізації. Для цього використовують спеціальні ізоляційні суміші, застосовують нові методи інтенсивного нагріву ливникової зони зливка, зменшують відношення Н/Д за рахунок збіль-

шення конусності, застосовують виливниці з ізольованими ливниковими вставками.

Згідно з дослідженнями [12, 16], перекачування металу під час заповнення виливниці не покращує макроструктуру зливка і може бути новим джерелом забруднення сталі включеннями. Тому сталь розливають без перекачування, яке лише сповільнює швидкість розливання в міру надходження металу в литник.

Щоб надати загальну картину сучасної технології виробництва шарикопідшипникової сталі, нижче також наводиться коротка інформація про зарубіжну практику виплавки [13].

Основні особливості технології виплавки шарикопідшипникової сталі в електродугових печах у США полягають у наступному

1. потужність трансформатора забезпечує більш високі температури плавлення, так що часткове окислення відбувається навіть при переплаві, але мало хрому вигорає через високий температурний режим

2. після періоду окислення на багатьох заводах проводять значне коксування ванни з зачисткою електродів і отриманням високовуглецевого ферохрому

3. остаточне розкислення здійснюється силікатом кальцію, який додається в потік металу під час розряду.

2.3 Проблема отримання сталі з невеликим вмістом неметалічних включень

Виробництво високооднорідних шарикопідшипникових сталей з мінімальним вмістом неметалевих включень є одним з найскладніших завдань у сучасному виробництві сталі. Оскільки виробництво низькосірчистих сталей в електродугових печах не є складним, металурги зосереджуються на боротьбі з оксидами та сферичними включеннями.

Досвід виробництва шарикопідшипникової сталі показав, що сталі з різних розплавів, отриманих за однією і тією ж технологією, можуть бути по-різному забруднені оксидними включеннями. Для того, щоб розробити методи підвищення чистоти сталі, необхідно знати основні джерела забруднення окисленими неметалевими включеннями.

Залежно від походження неметалеві включення можна розділити на ендогенні та екзогенні.

Ендогенні включення утворюються в рідкій сталі в результаті фізико-хімічних процесів [20, 21]:

а) включення, що утворюються в сталі під час виплавки та розкислення (первинні включення);

б) включення, що утворюються в сталі в результаті додаткового окислення під час виробництва і розливання та підвищення розкислювальної здатності елементів під час охолодження сталі (вторинні включення).

Екзогенні включення з'являються в сталі внаслідок

а) забруднення шихтових матеріалів;

б) частинок шлаку, що залишилися в металі; і

в) включення у вогнетривкій футеровці, на яку поміщають рідку сталь під час виплавки та розливання.

В даний час все ще неможливо сказати, якою мірою окремі джерела забруднення впливають на якість шарикопідшипникових сталей. Наприклад, більшість металургів вважають, що шихтові матеріали можуть мати значний вплив на вміст сірки і сульфідне забруднення готової сталі, але не на чистоту сталі з точки зору оксидних включень.

Дослідження Б. В. Старка і Т. Л. Керліна [22] показали, що всі включення розміром більше 10 мкм з рідкої ванни встигають спливати в шлак і тому показник включень готової сталі, отриманої одним і тим же способом виплавки, в значній мірі не залежить від чистоти вихідної сировини.

У той же час, вважається, що включення, які утворюються під час випуску, розливання і кристалізації сталі, значно збільшують забрудненість сталі [9, 11, 22-28] на шляху від нагрівальної печі до виливниці. Однак оцінка ролі їх джерела у формуванні включень відрізняється.

У низці досліджень з цього питання визначався вплив вогнетривків на забруднення сталі оксидними включеннями [18, 26]. Серед інших методів використовувалися точні вимірювання ступеня зносу "мічених атомів" і футеровки ковша. Результати показали, що частка включень з вогнетривкої футерівки ковша становить

3-5% від загальної маси включень у сталі. Однак включення зовнішнього походження, як правило, є великими і можуть мати значний вплив на оцінку якості сталі з використанням еталонної шкали оцінки.

Існує також припущення, що в оцінці включень переважають продукти реакцій, що утворюються в процесі розкислення і зрідження під час затвердіння злитка, і що частка цих включень зростає зі збільшенням маси злитка [20].

Однак вплив цих джерел (футеровка ковша і процеси під час кристалізації) обмежений через їх малу частку в загальній кількості включень.

Основним джерелом включень у сталі деякі металурги вважають процес заплутування шлаку на виході з печі [22, 27, 29], що пояснюється зниженим поверхневим натягом шлаку, який містить підвищений вміст карбідів кальцію.

Дійсно, при випуску розплаву під карбідний шлак збільшується забруднення сталі включеннями [16, 17]. Спеціальне дослідження процесу емульгування пічного шлаку [19] показало, що вплив цього фактора на забрудненість сталі включеннями незначний (в межах 1,2-5,1% від загальної маси включень в сталі). Однак перевірка впливу цього фактора на виробничі умови при виплавці білого шлаку не підтвердила правильність цих припущень [14, 17]. Останнім часом обробка розплавленої сталі шлаком для десульфурзації та видалення неметалевих включень широко використовується у виробництві високоякісної сталі [29].

Значна кількість неметалевих включень у сталі утворюється в результаті вторинного окислення під час виплавки та розливання, до 32% [28]. Це особливо стосується високовуглецевих сталей, тобто шарикопідшипникових сталей, які остаточно розкислюються в печах, що містять алюміній і кремній. Вторинне окислення зростає зі збільшенням поверхні падаючого струменя металу, часу випуску і температури сталі [11].

Значна частина включень є продуктами розкислення сталі. У шарикопідшипникових сталях ця частка становить близько 40% від загальної кількості включень [27].

Досвід експлуатації заводів показав, що метод розкислення (і використовуваний розкислювач) має значний вплив на розмір, форму і кількість неметалевих включень, що утворюються [7, 9, 11, 12, 14, 17]. Наприклад, було встановлено, що

заміна методу осаджувального розкислення в кінці періоду відновлення на дифузійний метод покращує чистоту сталі за вмістом неметалевих включень. Тому думка деяких дослідників, які заперечують вплив внутрішньопічного розкислення на вміст неметалевих включень у сталі, є помилковою. Однак, як показали випробування, дифузійне розкислення через шлак подрібненим феросиліцієм також супроводжується осадовим розкисленням, що залежить від часу розкислення карбідним шлаком [17], і при достатньому розкисленні металу призводить до утворення сферичних включень.

З метою скорочення періоду відновлення і загального періоду виплавки, а також підвищення чистоти сталі металургійний комбінат спільно з Центральним металургійним і гірничим інститутом розробив модифіковану технологію виплавки шарикопідшипникової сталі, яка була впроваджена у виробництво. Основними особливостями цієї технології є розкислення осаду на початку відновлювального періоду і остаточне розкислення сталі з підвищенням вмісту алюмінію на 0,5 кг/т. Було досягнуто покращення чистоти сталі за вмістом неметалевих включень. Значна частина останніх досліджень була спрямована на пошук найкращого варіанту розкислення для шарикопідшипникових сталей [14, 18, 25].

В якості розкислювачів були випробувані феросплави кальцію, барію, ванадію, цирконію і титану. Силікат кальцію (2-3 кг/т) широко використовувався для остаточного розкислення сталі в ковші на багатьох заводах. Це призводило до незначного зниження вмісту оксидів у сталі. Однак було виявлено, що використання силікокальцію як розкислювача призводить до утворення великих сферичних включень розміром до 60 мікрон, і тому його більше не застосовували. Використання феротитану не мало меліоративного ефекту. Ймовірно, це було пов'язано з високим вмістом алюмінію у феротитані. Використання цирконію як розкислювача призводить до утворення в сталі нітридів, що негативно впливає на властивості сталі.

Таким чином, використання різних розкислювачів не змінило загальний рівень забруднення сталі шарикопідшипника. Основна зміна полягала у формі та розподілі включень.

Виробництво сталі, вільної від оксидних включень, є складним завданням. Щоб вирішити цю проблему, процес виробництва і методи розкислення шарико-підшипникових сталей повинні бути розроблені таким чином, щоб запобігти утворенню продуктів розкислення в рідкій ванні. З цією метою найбільш доцільно попередньо видаляти кисень шляхом його реакції з вуглецем у вакуумі, щоб під час остаточного розкислення сталі феросплавами утворювалося мінімум включень.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Відомо, що використання вакууму для розкислення сталі призводить до того, що продуктами цього процесу є окис вуглецю, тоді як, якщо розкислення здійснювати за класичною технологією, завжди ту чи іншу кількість продуктів розкислення залишається в металі.

Відомо, що для шарикопідшипникової сталі найбільш важливою характеристикою є ступінь її чистоти від неметалевих включень. Було поставлено завдання виготовити цю сталь без застосування феросиліцію, що є нарівні з алюмінієм основним джерелом силікатних і алюмосилікатних включень в сталі.

Проведення дослідних плавок і методика контролю

Чотири плавки безкремністої шарикопідшипникової сталі вагою по 16 т розливали в виливниці для злитка вагою 4,1 т.

Після закінчення вакуумування нерозкисленої кремнієм і алюмінієм сталі ківш з металом подавали на розливання, а для остаточного розкислення на двох плавках додавали алюмінію 60-100 г/т в центрову, замість 6 кг FeSi і алюмінію 160 г/т при розкисленні в звичайних плавках з вакуумуванням сталі в ковші.

На інших двох плавках алюміній додавали в виливницю і розкислюють тільки один злиток від плавки; другий злиток на цьому ж піддоні буде розкислений. Решта металу на цих двох плавках розливали зверху в виливницю під вакуумом (третій злиток плавки) і зверху в виливницю на повітрі (четвертий злиток плавки).

Алюміній додавали в виливницю (один злиток) на двох плавках для вивчення включень у неокисленій шарикопідшипниковій сталі при різних способах розливання.

З квадрату 78 мм відбирали проби на відстані 16, 30, 62 і 97,5%, рахуючи від головної частини зливка, і проби з готового профілю (коло 16-19 мм). З проб після контролю макроструктури були вирізані 40 зразків (по 10 шт. від кожного контрольного перетину) для металографічного дослідження.

Макроструктура. Встановлено, що макроструктура сталі, розкисленої алюмінієм в центровій, не відрізняється від макроструктури сталі, виготовленої зі

звичайним розкисненням в ковші під вакуумом. Порівнювали також макроструктуру темплетів безкремністої сталі зі звичайною розкисненою в ковші під вакуумом. Зіставленням виявлено:

а) в зливку вакуумованої безкремністої сталі з подальшим розкисненням її в центровій алюмінієм 70 г/т відсутні бульбашки або свищі;

б) усадкова рихлість в зливку безкремністої сталі помітно менше, ніж у злитку звичайної сталі;

в) в зливку безкремністої сталі відсутній позавісєва неоднорідність («вуса»).

Темплети злитка безкремністої сталі порівнювали з кількома темплетами звичайної вакуумованої і розкисненої в ковші сталі. На рис. 3.1 наведені темплети двох злитків.

Вже повідомлялося, що після додавання феросиліцію в ківш під вакуумом відбувається короткочасне збільшення інтенсивності дегазації. Це відбувається завдяки дії феросиліцію в якості затравки. Крім того, відбувається додаткове виділення газів, що вносяться, хоча і в дуже обмеженій кількості, феросиліцію.

В даний час важко пояснити відсутність «вусів», але якщо вважати, що «вуса» є слідами газів, що виділяються в процесі кристалізації злитка, їх відсутність в зливку безкремністої сталі можна пояснити значно меншою кількістю газів в цій сталі.

Забрудненість безкремністої і звичайної вакуумованої шарикопідшипникової сталі.

При металографічному дослідженні безкремністої сталі для оцінки її загальної забрудненості, крім середнього з максимальних балів (по ГОСТ 801-47), визначали також середній бал кожного виду включень з 25 полів зору і кількість включень методом підрахунку по площах. Результати контролю представлені окремо для сталі, розкисненої алюмінієм в центровій і розкисненої в виливниці (табл. 3.1, 3.2, 3.3). На підставі наведених даних і після визначення критерію достовірної різниці можна зробити висновок:

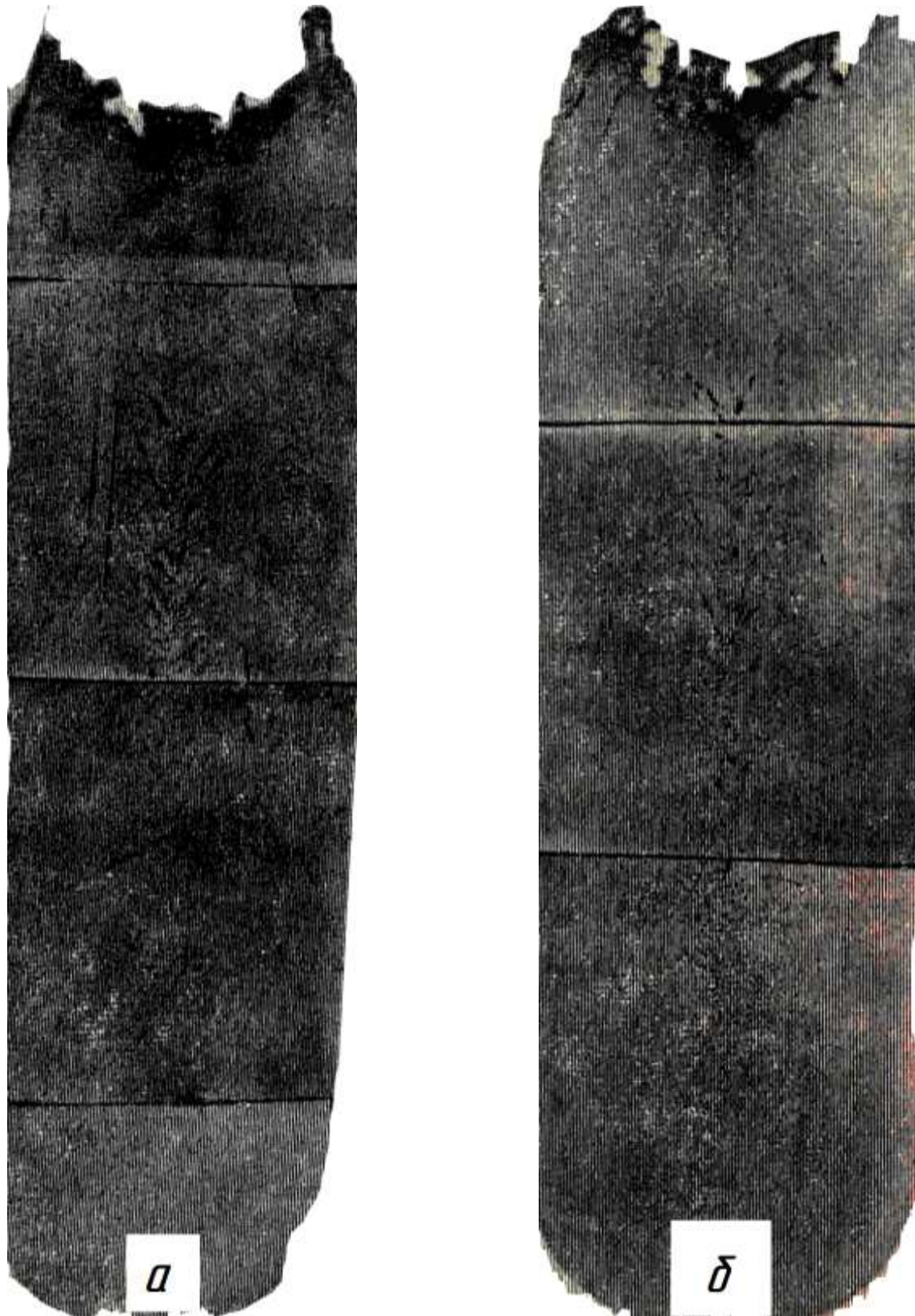


Рисунок 3.1 – Макроструктура злитка шарикопідшипникової сталі, розкисленої 45%-им феросиліцію і алюмінієм після ковшового вакуумування (а), і злитка безкремністої шарикопідшипникової сталі, розкисленої після ковшового вакуумування тільки алюмінієм в центровій в кількості 70 г/т (б)

Таблиця 3.1 - Порівняння якості безкремністої і звичайної вакуумованої шарикопідшипникової сталі в колі 14-24 мм

Номер плавки і варіант технології	число зразків	Середній бал неметалічних включень			число зразків	Середній бал неметалічних включень з 25 полів зору			Кількість включень, підрахована по площах, %		
		оксиди	сульфіди	глобули		оксиди	сульфіди	глобули	оксиди	сульфіди	глобули
Т1486, розливання на повітрі, розкислення в центровій	35	0,71 ± 0,083	0,90 ± 0,060	0,50 ± 0,010	15	0,080 ± 0,017	0,15 ± 0,019	0,036 ± 0,014	0,00098 ± 0,00021	0,00262 ± 0,00035	0,00019 ± 0,00003
5Т0316, розливання на повітрі, розкислення в центровій	56	0,64 ± 0,066	1,12 ± 0,063	0,51 ± 0,036	20	0,036 ± 0,012	0,20 ± 0,028	0,036 ± 0,015	0,00060 ± 0,00010	0,0032 ± 0,0004	0,000184 ± 0,00002
8Т0316, розливання у вакуумі	54	0,58 ± 0,062	2,50 ± 0,073	0,28 ± 0,036	20	0,064 ± 0,026	0,62 ± 0,060	0	0,00070 ± 0,00013	0,0093 ± 0,00019	0
Звичайні плавки з застосуванням вакууму, розливання на повітрі	106	0,82 ± 0,037	1,20 ± 0,042	0,74 ± 0,042	20	0,204 ± 0,020	0,28 ± 0,025	0,050 ± 0,014	0,00255 ± 0,00036	0,00445 ± 0,00047	0,00030 ± 0,00005

Таблиця 3.2 - Порівняння якості безкремністої і звичайної вакуумованої шарикопідшипникової сталі в квадраті 78 мм

номер плавки і варіант технології	число зразків	середній бал неметалічних включень			число зразків	середній бал включень в 25 полях зору		
		оксиди	сульфіди	глобули		оксиди	сульфіди	глобули
Т1486, розливання на повітрі, розкислення в центровій	24	3,04 ± 0,28	2,83 ± 0,23	0,29 ± 0,19	12	0,51 ± 0,053	0,94 ± 0,063	0,01
5Т0316, розливання на повітрі, розкислення в центровій	40	2,78 ± 0,12	3,04 ± 0,06	1,26 ± 0,21	20	0,52 ± 0,037	1,45 ± 0,042	0,09 ± 0,021
8Т0316, розливання у вакуумі	40	1,06 ± 0,11	3,26 ± 0,08	0	20	0,13 ± 0,014	1,80 ± 0,031	0
Звичайні плавки з застосуванням вакууму, розливання на повітрі	520	2,65 ± 0,14	2,80 ± 0,07	1,25 ± 0,14	24	0,62 ± 0,028	1,41 ± 0,027	0,096 ± 0,06

1. Безкремніста шарикопідшипникова сталь, розкислена алюмінієм в центровій (плавки T1486 і 5T0316) по балу оксидів і сульфідів у великому і дрібному профілі, знаходиться на рівні звичайної вакуумованої і розкисленої сталі в ковші під вакуумом. Загальна забрудненість безкремністої сталі в дрібному профілі трохи нижче, ніж в зазвичайній вакуумованій сталі в ковші.

2. Безкремніста сталь, розкислена алюмінієм в виливниці, виявилася більш забрудненою оксидними включеннями. Припускаємо, що джерелами забруднення є продукти розкислення алюмінієм, що додається в метал через рідке дзеркало (рант) між стінкою виливниці і скоринкою злитка. Оксиди не встигають спливати і заплутуються між зростаючими кристалами.

Таблиця 3.3 – Порівняння якості вакуумованої безкремністої і звичайної шарикопідшипникової сталі (40 зразків)

номер плавки	варіанти	Середній бал неметалічних включень			Середній бал включень з 25 полів зору		
		оксиди	сульфіди	глобули	оксиди	сульфіди	глобули
B0813	Розкислення в виливниці						
	Метал не розкислений	3,62	2,80	-	1,30	1,18	-
	розлив:						
	сифоном	3,46	3,96	0,12	1,42	2,07	0,005
	зверху	3,12	3,48	1,3	1,12	1,5	0,005
	У вакуумі	1,20	3,58	-	0,12	2,20	-
ТІ 102	Розкислення в виливниці						
	Метал не розкислений	3,55	3,11	-	1,88	1,64	-
	розлив:						
	сифоном	3,23	3,28	-	1,36	1,70	-
	зверху	2,18	4,20	-	0,31	2,55	-
	в вакуумі	1,56	2,71	-	0,21	1,35	-
звичайні плавки		2,50	2,29	-	0,75	0,92	-

Результати металографічного контролю підтверджуються даними за загальною кількістю включень в сталі (%), визначених методом електролітичного розчинення зразків сталі по п'яти штук від кожного варіанта розкислення.

Звичайні плавки, розкислення в ковші під вакуумом 0,0026

Безкремніста сталь:

Розкислення струменя в центровій при розливанні 0,0031

Розкислення в виливниці 0,0083

Розливання в виливниці під вакуумом 0,0048

1. Низька загальна забрудненість і найменший бал оксидів виявлені в безкремністій сталі після вакуумування в ковші і розливання у вакуумі без добавки розкислювачів (табл. 3.1-3.3). У злитках тих же самих плавок В0813 і Т1102 (табл. 3.3), але відлитих в виливниці зверху без повторного вакууму, бал оксидів і загальна забрудненість набагато більше. Отже, частина оксидних включень видаляється внаслідок кипіння металу в виливниці при повторному вакуумування.

2. На всіх безкремністих плавках виявлено меншу кількість глобул в порівнянні зі звичайними плавками при вакуумуванні сталі в ковші.

3. Сульфідів менше в сталі, розкисленої алюмінієм; дещо більше їх в неокисленому металі з подвійним вакуумуванням, і найбільша кількість сульфідів виявлено в неокисленій сталі, вакуумованій в ковші.

4. Вакуумована в ковші і нерозкислена кремнієм і алюмінієм сталь, відлита сифонним способом, більше забруднена включеннями, ніж при розливанні зверху.

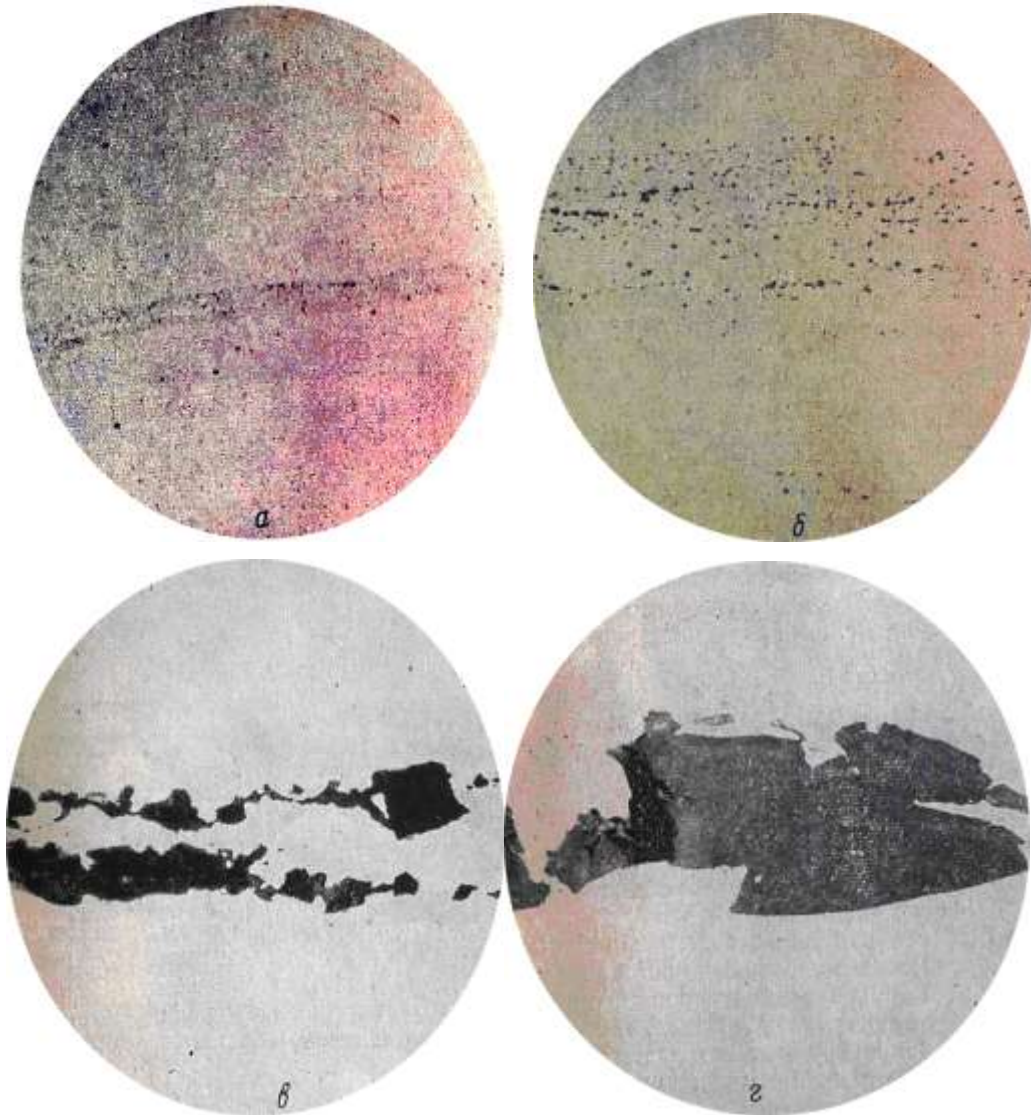
Дослідження неметалічних включень безкремністої шарикопідшипникової сталі

Вивчення природи неметалевих включень в нерозкислених кремнієм і алюмінієм сталях може дати додаткові відомості про роль окремих джерел включень. Металографічне дослідження проводилося паралельно з оцінкою забрудненості безкремністої сталі.

У безкремністій сталі і при відсутності добавок алюмінію основна маса оксидних включень є дисперсні частинки розміром в доли мікрона; лише окремі включення досягають величини 10 мкм (рис. 3.2, а, б). Такі ж включення і іноді більші зустрічаються в нерозкислених безкремністих сталях з подвійним вакуумуванням.

У безкремністій сталі, що відлита сифоном (розкисленій і нерозкисленій алюмінієм), помітно збільшується частка тендітних алюмосилікатів в оксидних рядках (рис. 3.2, в), що, ймовірно пояснюється впливом шамотної футеровки ковша і сифонної проводки. Іноді в сталі, відлитій цим способом, обриваються грубі шамотні включення (рис. 3.2, г). У безкремністій сталі одинарного і подвійного

вакуумування, крім сульфідів, виявлені пластичні оксисилікати, які за шкалою ГОСТ 801-47 відносять до групи сульфідів (рис. 3.3, 3.4).



а - відлитою зверху без добавок алюмінію; б - те ж, але при більшому збільшенні;
в - включення крихкоподрібнених алюмосилікатів (розливання сифоном); г -
включення шамоту (розливання сифоном)

Рисунок 3.2 - Оксидні включення в безкремністій шарикопідшипниковій сталі

На рис. 3.3, а, б представлені складні сульфідні включення виявлені в зливку безкремністої сталі з подвійним вакуумуванням; на рис. 3.3, в показаний інший тип пластичних включень, в яких помітний перехід від силікату з великим вмістом FeO і MnO до силікату з високим вмістом SO₂. Структура і пластичність оксисилікатних включень залежить від співвідношення в них окислів FeO, MnO і SO₂. Ясно, що навіть при подвійному вакуумуванні нерозкислених сталей, при залишковому тиску 10-20 мм рт. ст., в системі не вдається знизити вміст кисню до

значень можливої розчинності його в твердому металі. Тому в процесі кристалізації металу на частинках висококремнистих силікатів (затравки) відбувається виділення надлишкового кисню у вигляді $\text{FeO} \cdot \text{MnO}$.

В безкремністій сталі і відлитої без добавок алюмінію на повітрі пластичні силікати мають темне, майже чорне забарвлення, що свідчить про більш високий вміст в них окислів FeO і MnO (рис. 3.3, г).



Рисунок 3.3 – Пластичні включення в шарикопідшипниковій сталі без кремнію і алюмінію: а - складні сульфіди; б - сульфіди і оксисульфіди; в - оксисилікати перехідного типу; г - включення з високим вмістом MnO і FeO

На рис. 3.4, а-г показана інша група включень, присутніх в безкремністій сталі при одинарному вакуумуванні в ковші; можна припустити, що в сталі без кремнію і без алюмінію сульфіди в процесі ліквації укрупнюються (рис. 3.4, а, б) і частково поглинають (рис. 3.4, в, г) дисперсні окисні частки.

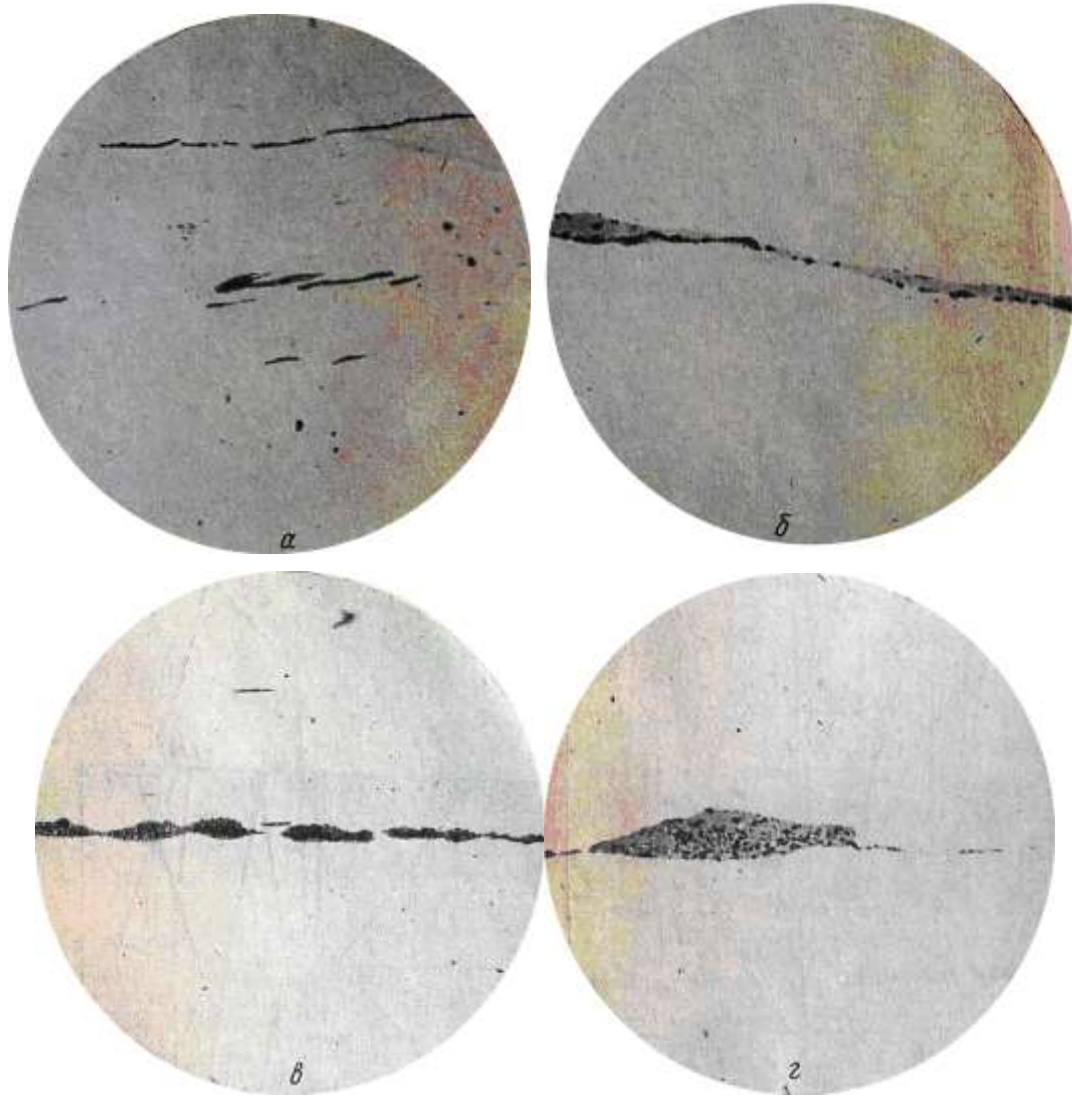


Рисунок 3.4 - Пластинчасті включення в шарикопідшипниковій сталі без кремнію і алюмінію: а - сульфідні включення; б - те ж, але при більшому збільшенні; в - оксисульфіди; г - те ж, але при більшому збільшенні

У безкремністій сталі, розкисленій алюмінієм в центровій або в виливниці, пластичні силікати майже зовсім відсутні, ймовірно, відбувається процес їх руйнування при додаванні алюмінію. Це може бути проілюстровано даними про розподіл включень по висоті зливка сталі, розкисленої в виливниці (рис. 3.5). Тут в зонах з мінімальною забрудненістю сульфідами виявлено максимальну кількість оксидів.

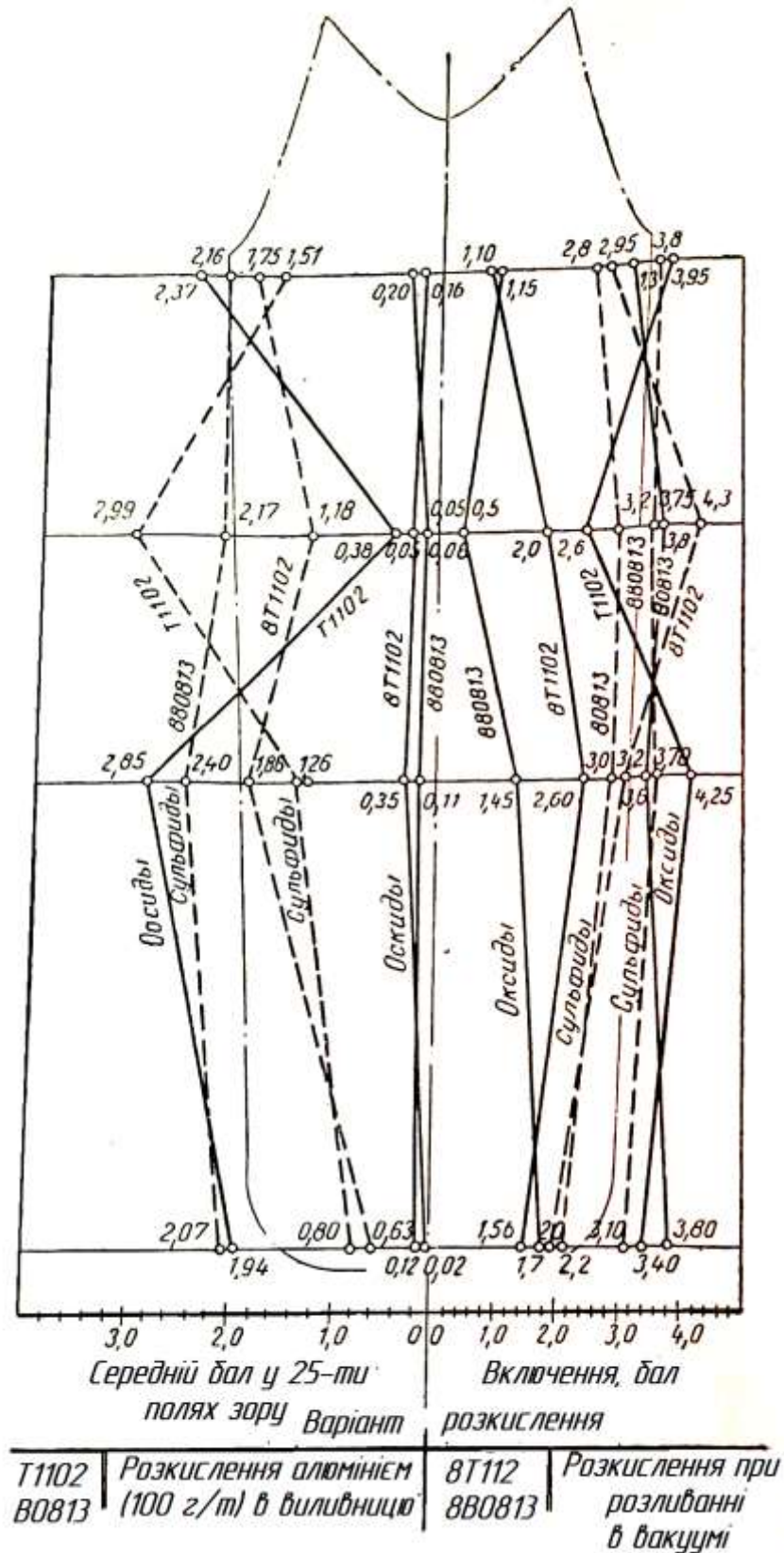


Рисунок 3.5 – Розподіл неметалевих включень в зливку безкремністої шарикоїдшипникової сталі

У злитку безкремністої сталі з подвійним вакуумуванням і без введення алюмінію сульфідів дещо більше, ніж у звичайній вакуумованій сталі, розкисленої

алюмінієм. Це пояснюється присутністю пластичних силікатів, які зазвичай включаються в групу сульфідів. Однак у порівнянні з нерозкисленою сталлю, відлитою на повітрі, знайдена кількість сульфідів все ж менше. Це пояснюється руйнуванням і спливанням легкоплавких силікатів при розливанні в вакуумі. Випробування безкремністої сталі, розкисленої алюмінієм в центровій, були проведені для з'ясування можливості використання її в промисловості.

Металографічне визначення чистоти безкремністої сталі

Забрудненість сталі включеннями визначали на 40 зразках від кожної плавки. Крім того, визначили загальну кількість включень за методом Українського інституту металів. Отримані дані досліджень порівняли з даними по шарикопідшипникової сталі, виплавленої за класичною технологією з повним розкисленням в печі, і з даними по сталі, отриманої за способом електрошлакового переплаву (табл. 3.3 і 3.4). Видно, що безкремніста сталь наближається по чистоті щодо неметалічних включень до сталі електрошлакового переплаву. Найбільше в безкремністій сталі точкових включень, найменше шкідливих - в шарикопідшипникової сталі.

Поліпшення якості безкремністої сталі в порівнянні з шарикопідшипниковою сталлю, виплавленою за класичною технологією, стало подальшим щаблем в новій технології виплавки цієї сталі.

Властивості безкремністої сталі після термообробки

На кількох партіях зразків різного профілю були проведені випробування на загартування і прокалювання безкремністої сталі, в результаті яких встановлено, що прийнятна структура і твердість ШХ15 (але без кремнію) виходить тільки при загартуванні з 880°C замість $845^{\circ}\text{C} + 10^{\circ}$ по ГОСТу.

При підготовці виробів для механічних стендових випробувань на 1-му ГПЗ загартування виробляли з температури $845 + 10^{\circ}\text{C}$ з наступним відпуском при 160°C . Була отримана твердість HRC = 61-62, що відповідає вимогам ГОСТу. Відзначимо, що отримані характеристики твердості тільки на дві одиниці по HRC нижче, ніж для шарикопідшипникової сталі з нормальним вмістом кремнію (табл. 3.5).

Таблиця 3.3 – Порівняння чистоти шарикопідшипникової сталі, виплавленої за різною технологією (% зразків, оцінених балами по ГОСТ 1778-57, профіль - коло 25-28 мм)

бал включень	оксиди				сульфіди				Силікати				глобулярні				точкові							
	Звичайна сталь, розкислення в печі		електрошлаковий переплав		безкремніста вакуумована сталь		Звичайна сталь, розкислення в печі		електрошлаковий переплав		безкремніста вакуумована сталь		Звичайна сталь, розкислення в печі		електрошлаковий переплав		безкремніста вакуумована сталь		Звичайна сталь, розкислення в печі		електрошлаковий переплав		безкремніста вакуумована сталь	
	39852	4192	T0316	T1486	39852	4192	T0316	T1486	39852	4192	T0316	T1486	39852	4192	T0316	T1486	39852	4192	T0316	T1486	39852	4192	T0316	T1486
0,0	0	0	17,5	52,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,0	0	0	0			
1,0	10,0	20,0	42,5	32,5	0	0	0	0	0	20,0	5,0	0	0	0	0	0	0	30,0	30,0	5,0	0			
2,0	10,0	40,0	15,0	5,0	0	40,0	7,5	20,0	0	10,0	30,0	45,0	0	0	0	2,5	20,0	50,0	80,0	22,5				
3,0	10,0	30,0	10,0	7,5	0	20,0	25,0	35,0	0	50,0	40,0	27,5	0	20,0	15,0	12,5	20,0	20,0	15,0	72,5				
4,0	60,0	10,0	7,5	0,0	30,0	20,0	42,5	37,5	0	20,0	20,0	20,0	0	50,0	55,0	25,0	0	0	0	0				
5,0	0,0	0,0	0	2,5	40,0	20,0	22,5	5,0	0	0	5,0	5,0	0	20,0	30,0	57,0	0	0	0	0				
6,0	10,0	0,0	0	0	30,0	0	2,5	2,5	0	0	0	2,5	10,0	10,0	0	2,5	0	0	0	0				
7,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	10,0	0	0	0	30,0	0	0	0	0	0	0	0				
8,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	20,0	0	0	0	50,0	0	0	0	0	0	0	0				
9,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	50,0	0	0	0	10,0	0	0	0	0	0	0	0				
10,0	0,0	0,0	0	0	0	0	0	0	20,	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Середній бал	3,6	2,3	1,3	0,8	5,0	3,2	3,9	3,3	8,8	2,7	2,9	2,9	7,6	4,2	4,1	4,4	1,3	1,9	2,1	2,8				

Таблиця 3.4 – Порівняння загальної кількості неметалевих включень в шарикопідшипникової сталі, виплавленої за різними технологіями

номер плавки	технологія виплавки	Завод-виробник	Діаметр прутка мм	Вміст неметалевих включень, визначений при збільшенні 280%
39852	Звичайна сталь, розкислення в печі	Завод «Дніпроспецсталь»	20	0,0147
4192	Сталь електрошлакової переплавки	Завод «Дніпроспецсталь»	23	0,0043
T0316	Безкремніста сталь із застосуванням вакууму	Завод «Червоний Жовтень»	28	0,0038

Таблиця 3.5 – Результати механічних випробувань шарикопідшипникової сталі, виготовленої за різними технологіями

варіант технологія	Розмір кульок, дюйми	Режим термічної обробки	число випробувань	Норма руйнівного навантаження, кг	Середня руйнівне навантаження при випробуванні, кг	твердість кульок <i>HRC</i>
Безкремніста сталь з використанням вакууму	25/32	Загартування з 850 + 10 ° С в содовому розчині, відпустку при 160 ° протягом 4,5 год.	12	20300	37375	61,7
Звичайна сталь ШХ15 з розкисленням в печі	25/32		12	20300	32541	64,2
Сталь ШХ15 електрошлакової переплавки	25/32		12	20300	38083	64,3

Результати механічних випробувань

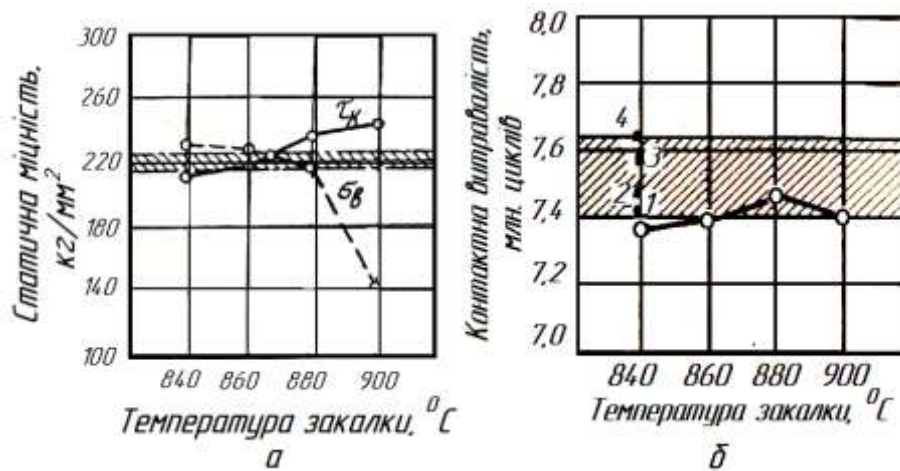
Три кульки в обоймі випробували методом роздавлювання [30]. У табл. 3.5 представлені середні дані руйнівного навантаження для шарикопідшипникової сталі, виплавленої за різними технологіями. З цих даних випливає, що середнє руйнівне навантаження кульок з безкремністої сталі вище навантаження для кульок зі звичайної шарикопідшипникової сталі, виготовленої за класичною техно-

логією, і наближається до значень навантаження для кульок зі сталі електрошлакового переплаву.

Дослідження статичної міцності безкремністої шарикопідшипникової сталі при розтягуванні і крученні, а також її контактної витривалості було проведено із застосуванням гарту з температур 840, 860, 880 і 900 ° С. При цьому в будь-якому вигляді було випробувано по 20 зразків. Середні дані випробувань по партіях наведені на рис. 3.6, де смугою показані межі відповідних характеристик для звичайної шарикопідшипникової сталі, виплавленої за класичною технологією, а кривими - для безкремністої сталі [31].

Видно, що статична міцність безкремністої сталі при розтягуванні і крученні в інтервалі температур гарту 840- 880 ° С зберігається на рівні звичайної сталі.

Контактна витривалість безкремністої сталі в інтервалі температур гарту з 860-900 ° С знаходиться на рівні властивостей звичайної шарикопідшипникової сталі, при цьому оптимальною температурою загартування, ймовірно, є 880 ° С.



а - статична міцність при розтягуванні ($\sigma_{\text{в}}$) і крученні ($\tau_{\text{к}}$) зразків з виточенням з безкремністої загартованої сталі ШХ15, відпуск 150 °, 2 години; б - довговічність зразків з безкремністої загартованої сталі ШХ15, відпуск 150 °, 2 год

Рисунок 3.6 – Механічні властивості безкремністої шарикопідшипникової сталі

На підставі дослідження властивостей безкремністої сталі можна вважати, що:

1. Макроструктура безкремністої шарикопідшипникової сталі така ж, як і вакуумованої сталі в ковші і розкисленої під вакуумом.

2. У злитку безкремністої сталі відсутня зональна ізоляція («вуса»), що вказує на менший вміст газів в сталі до моменту її кристалізації.

3. Забрудненість оксидами безкремністої сталі, розкисленої алюмінієм в центровій така, же, що і сталі розкисленої феросиліцієм і алюмінієм під вакуумом в ковші. При розкисленні безкремністої сталі алюмінієм в виливниці забрудненість її оксидами збільшується. У безкремністій сталі міститься найменша кількість глобулярних включень.

4. Мінімальна кількість оксидів виявлено в сталі після подвійного вакуумування і без добавок алюмінію. Однак через недостатнє розкисленням в цій сталі знайдено підвищену кількість пластичних силікатів (які зараховуються до сульфідів).

5. Отримано непрямі дані про можливий вплив на забрудненість шарикопідшипникової сталі шихтових матеріалів, феросплавів і шамотних вогнетривів.

6. В результаті металографічних і механічних випробувань безкремністої сталі встановлені більш високі властивості вакуумованої безкремністої підшипникової сталі, ніж у сталі, виплавленої за класичною технологією.

Таким чином, перші досліді по заміні кремнію як розкислювача і легуючого елемента в сталі вакуумної обробкою дали позитивні результати.

Зрозуміло, що поки мало дослідного матеріалу для остаточних висновків про придатність нової марки шарикопідшипникової сталі без кремнію для служби за призначенням, проте на підставі поглибленого контролю якості цієї сталі можна зробити висновок:

1. Безкремніста сталь, вакуумована в ковші і потім при розливанні на повітрі, розкислення алюмінієм в центровій, може бути використана для виробництва кульок, роликів і малогабаритних підшипників.

2. Безкремніста сталь з подвійним вакуумуванням без добавок алюмінію може бути з успіхом використана в якості вихідної заготовки для вакуумного дугового і електрошлакового переплаву. Такий процес дозволить виключити одну із

ступенів двох-триразової переплавки; крім того, в процесі переплавки, ймовірно, легкоплавкі силікати будуть додатково віддалятися зі сталі.

3.1 Баланс кремнію і забезпечення його заданого вмісту в безперервнолитої автолистової сталі

В Україні досвід освоєння виробництва низьковуглецевих безкремністих сталей, що відносяться до так званої автолистової групи, налічує приблизно 10-15 років. Кінцевим споживачем листа з таких сталей є автомобільна промисловість. До таких марок сталей належать 1008, 1010, 1L20, 1W23, HSLA-0655.

Зокрема, найбільшим попитом в сортаменті користується сталь марки 1006 (таблиця 3.6), вироблена за стандартом SAE (Спільнота автомобільних інженерів).

Таблиця 3.6 – Хімічний склад сталі SAE 1006

Елемент	C	Mn	Si	Al	S	P
Вміст, %	0,02-0,05	0,2-0,3	<0,025	0,03-0,06	<0,010	<0,015

Основними проблемами, з якими зіткнулися технологи при освоєнні виробництва таких сталей стало забезпечення необхідних параметрів їх розливання на МБЛЗ і заданого вмісту кремнію. Якщо першу проблему вдалося вирішити за допомогою застосування, дротів, що містять кальцій, то друга залишається актуальною і сьогодні.

Однією з особливостей автолистових сталей є те, що кремній в них - шкідлива домішка. Забезпечення високої пластичності, що дозволяє домогтися глибокої витяжки при холодній прокатці без утворення дефектів (розривів, тріщин), є головною проблемою для технологів сталеплавильних цехів і, в той же час, головною вимогою до якості такого металу. У свою чергу, межа плинності сталі залежить від вмісту домішок, особливо кремнію, зміст якого не повинно перевищувати 0,02-0,03%.

У раніше проведених роботах було встановлено, що підвищення вмісту кремнію в сталі відбувається в результаті протікання процесів алюмо- і карботер-

мії кремнію з SiO_2 [32]. При цьому аналіз виробничих даних показує, що основний приріст вмісту кремнію в металі відбувається при його позапічній обробці на УКП (рисунок 3.7), а при обробці на установці позапічної обробки сталі (УПОС), при транспортуванні і розливання збільшення вмісту кремнію більш ніж в два рази менше.

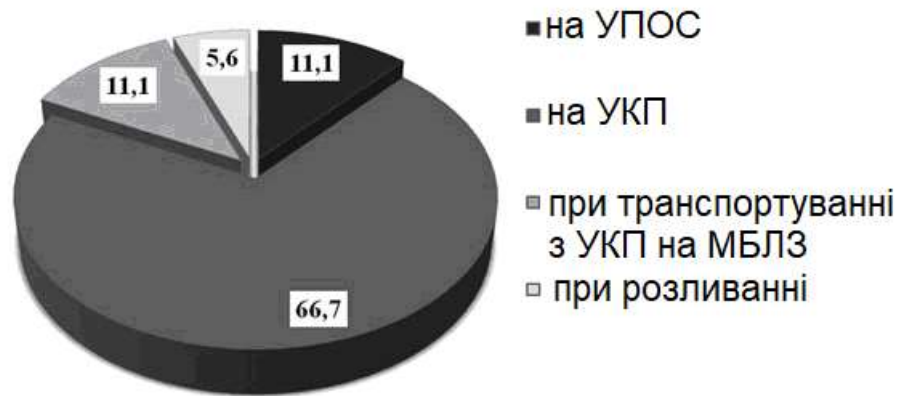


Рисунок 3.7 – Приріст вмісту кремнію в сталі на різних етапах технології виробництва безперервнолитих слябів автолистових сталей, %

У даній роботі поставлена задача встановити, що служить джерелом надходження кремнію і/або його оксиду в метал і шлак, тобто по суті, скласти баланс кремнію при виробництві безперервнолитих слябів автолистових сталей.

Розглянемо матеріали, що застосовуються при позапічній обробці щодо вмісту в них кремнію в чистому вигляді або у вигляді SiO_2 в міру їх надходження в сталерозливний ківш.

1. Конвертерний шлак (середній склад наведено в таблиці 3.7) потрапляє в ківш при випуску металу з конвертера, причому в умовах нестабільної роботи системи відсічення шлаку або її відсутності його кількість іноді досягає 5 кг/т сталі, тобто в ківш ємністю 300 т потрапляє близько 1,5 т шлаку.

2. Шлакоутворювальні. Вапно (хімічний склад наведено в таблиці 3.8) спочатку вводиться при випуску напівпродукту з конвертера і під час попередньої позапічної обробки на установці позапічної обробки сталі (УПОС), виробленої після закінчення випуску і перед транспортуванням на УКП, а потім на самій УКП для формування рафінувальні шлаку. Також на УКП як розріджувачів і шлако-

утворювальних застосовують плавиковий шпат (таблиця 3.8) і відходи виробництва вторинного алюмінію - алюмофлюс (таблиця 3.9).

Таблиця 3.7 – Середній хімічний склад кінцевого конвертерного шлаку

Компонент	CaO	SiO ₂	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃
Вміст, %	46,5	15,7	4,3	16,6	11,3

Таблиця 3.8 – Хімічний склад плавикового шпату

Компонент	CaF ₂	SiO ₂	S	P
		Не більше		
Вміст, %	≥75	20	0,3	0,3

Таблиця 3.9 – Хімічний склад алюмофлюсу

Компонент	Al _{мет}	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O+Na ₂ O	H ₂ O
Вміст, %	15-20	60-70	8-10	7	2

3. Розкислювачі та легуючі. Оскільки вміст кремнію в автолистових сталях обмежена, їх розкислення проводять виключно алюмінієм. Алюміній вводиться на випуску з конвертера у вигляді чушок (іноді у вигляді фероалюмінію) для попереднього розкислення металу. На УКП алюмінієвими чушками проводять остаточне розкислення металу, алюмінієвими гранулами - розкислення шлаку, алюмінієвим дротом - мікролегування сталі. Алюмінієвий дріт містить не менше 99,0% Al_{мет}, а також 1% Si і домішок кольорових металів. Склад застосовуваного вторинного алюмінію (чушки і гранули) наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Хімічний склад алюмінію вторинного марки АВ87

Компонент	Al	Mg	Cu	Zn	Si	Pb	Sn
		Не більше					
Вміст, %	≥87	3,0	3,8	3,3	5,0	0,3	0,2

Єдиним легуючим елементом розглянутих сталей є марганець. Оскільки сталі відносяться до низько вуглецевих, для легування марганцем застосовують металевий марганець або низьковуглецевий феромарганець, причому останній з

економічних міркувань застосовують набагато частіше. Згідно технології феромарганець (таблиця 3.11) вводять для попереднього розкислення-легування на УПОС, а потім на УКП для доведення металу за хімічним складом.

Таблиця 3.11 – Хімічний склад феромарганцю марки ФМн90 (РБ)

Компонент	Mn	C	Si	S	P
		Не більше			
Вміст, %	85-95	0,5	1,8	0,03	0,3

4. Футеровка сталерозливних ковшів під час позапічної обробки металу піддається інтенсивному зносу в результаті розмивання потоками металу при продувці аргоном, а також при хімічній взаємодії з металом і шлаком. Для стін ковшів застосовують періклазовуглецеву футеровку, для шлакового пояса - періклазовуглецеву з підвищеним вмістом вуглецю (таблиця 3.12). Згідно виробничими даними середньорічна витрата складає 2,8 кг/т сталі.

Таблиця 3.12 – Хімічний склад футерування сталерозливного ковша

Футерування	Вміст, %			
	MgO	C	Al ₂ O ₃	SiO ₂
			Не більше	
Стіни	≥84	8	6.5	1.5
Шлаковий пояс	≥76	16	6.5	1.5

На основі аналізу виробничих даних 638 плавок сталей автолистового сортаменту були розраховані середні значення витрат шлакоутворюючих, розкислювачів, легуючих, футерування, кількості конвертерного шлаку і кінцевого рафінувального шлаку в сталерозливних ковші. На підставі цих даних був проведений розрахунок кількості і частки SiO₂, що вноситься кожним з розглянутих вище джерел при позапічній обробці металу на УПОС і УКП (таблиця 3.13).

На рисунку 3.8 представлена діаграма, що ілюструє пайовий розподіл матеріалів відповідно до кількості SiO₂, яке вони вносять в рафінувальні шлак.

Як видно з рисунка 3.8, основними джерелами SiO₂, який в свою чергу служить джерелом відновлення кремнію, є конвертерний шлак, що потрапляє в сталерозливний ківш при випуску металу з конвертера, а також алюмінієві чушки і

шлакоутворюючі (вапно, плавиковий шпат, алюмофлюс), що використовуються на УПОС і УКП.

Таблиця 3.13 – Кількість і частка SiO_2 , яку вносять матеріали

Матеріал	Середня витрата, кг/пл..	Кількість SiO_2 , кг/пл	Частка в загальній кількості SiO_2 , %
Конвертерний шлак	790	126,4	37,8
Вапно	3200	57,6	17,2
Плавиковий шпат	175	35,0	10,5
Алюмофлюс	230	20,7	6,2
Алюмінієві чушки	550	58,9	17,6
Алюмінієві гранули	110	11,8	3,5
Алюмінієва проволочка	235	5,0	1,5
феромарганець	370	6,7	2,0
Футерування	840	12,6	3,8
Кінцевий шлак УКП	6500	334,7	100,0



Рисунок 3.8 – Пайовий розподіл матеріалів відповідно до кількості SiO_2 , яке вони вносять в рафінувальний шлак

Для зниження кількості SiO_2 в рафінувальному шлаку УКП необхідно з одного боку жорстко контролювати кількість потрапляємого конвертерного шлаку при випуску металу шляхом застосування ефективних систем відсічення, а з іншого - застосовувати матеріали високої чистоти за вмістом кремнію або SiO_2 . Однак, як показав досвід роботи досягти одночасного дотримання цих вимог по ряду причин як економічного, так і організаційного характеру не завжди вдається. У зв'язку з цим, виникла необхідність удосконалення технології отримання автолістової сталі з мінімальним вмістом кремнію в існуючих виробничих умовах і при мінімальних витратах.

За наявними виробничими даними було визначено, що приріст вмісту кремнію в сталі відбувається в переважній більшості випадків в кінці її позапічної обробки на УКП. Про це свідчать дані про вміст кремнію в пробах металу, відбирали по ходу обробки групи плавок на УКП, від першої до контрольної (рисунок 3.9).

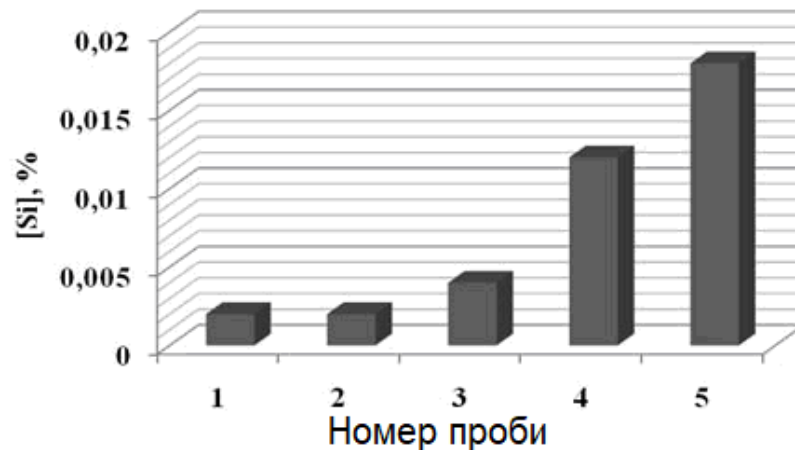
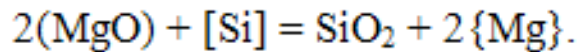


Рисунок 3.9 – Середній вміст кремнію в пробах металу по ходу обробки на УКП

Як видно з рисунку 3.9, значний приріст вмісту кремнію відбувається на завершальному етапі позапічної обробки, який відповідає пробам № 4 і 5. У цей час кремній, що утворився біля електродуги при нагріванні металу і шлаку в результаті процесів алюмо- і карботермії з SiO_2 більше не може окислюватися киснем і переходить в метал. Це пояснюється тим, що до цього часу метал і шлак вже повністю безкисневим алюмінієм, в присутності якого (як більш сильного розкислювача) кремній окислюватися не буде. При цьому найчастіше вміст кремнію в металі перевищує допустимі межі, що призводить до відсортування готових слябів за хімічним складом.

Для удосконалення технології був запропонований і реалізований спосіб позапічної обробки низьковуглецевих безкремністих сталей, який передбачає видалення кремнію з металу шляхом ініціації процесу силікотермії магнію при введенні оксиду магнію в зону високих температур електричної дуги УКП. Згідно з даними роботи [33] при температурі понад $2200\text{ }^\circ\text{C}$, що досягається в зоні роботи дуги, кремній може бути відновником магнію. Отже, при введенні оксиду магнію

в зону роботи дуги кремній, розчинений в металі, і відновлюваний з кремнезему будуть витрачатися на відновлення магнію з MgO по реакції:



Таким чином можна не тільки запобігти переходу кремнію в метал, а й знизити його вміст в сталі.

Для підтвердження гіпотези про протікання процесу силікотермії магнію були проведені додаткові дослідження шляхом організації двухфакторного експерименту.

Як досліджуваних факторів були обрані масова витрата оксиду магнію M_{MgO} (кг) і тривалість дугового нагріву металу t_H (хв.) після присадки MgO-вмісного матеріалу.

Відповідно до плану експерименту було проведено 9 дослідів на плавках марки сталі 1006. Як MgO-вмісний матеріалу застосовувався порошок Dalmond PL-66, застосовуваний для торкретування футерування стальковшів, з вмістом MgO понад 66%, SiO₂ менше 1%, Al₂O₃ близько 2%, Fe₂O₃ менше 3%, CaO - інше.

На підставі проведених досліджень була отримана залежність зменшення вмісту кремнію в сталі від витрати оксиду магнію і тривалості дугового нагріву металу, що має вигляд:

$$\Delta\text{Si} = -0,0025 + 1,1305 \cdot 10^{-5} \cdot M_{\text{MgO}} + 0,0009 \cdot \tau_H - 9,5208 \cdot 10^{-8} \cdot M_{\text{MgO}}^2 - 0,0001 \cdot \tau_H^2 + 9,25 \cdot 10^{-6} \cdot M_{\text{MgO}} \cdot \tau_H.$$

За отриманим рівнянням побудована графічна залежність зміни вмісту кремнію в сталі від витрати оксиду магнію і часу нагрівання металу (рисунок 3.10).

Отримані дані показують значну залежність зміни вмісту кремнію в сталі як від витрати оксиду магнію, так і від часу дугового нагріву. Як видно, максимальна кількість кремнію можна видалити з металу шляхом введення в зону роботи дуги максимально можливої кількості оксиду магнію, забезпечивши при цьому необхідний час горіння дуги для найбільш повного протікання процесу силікотермії.

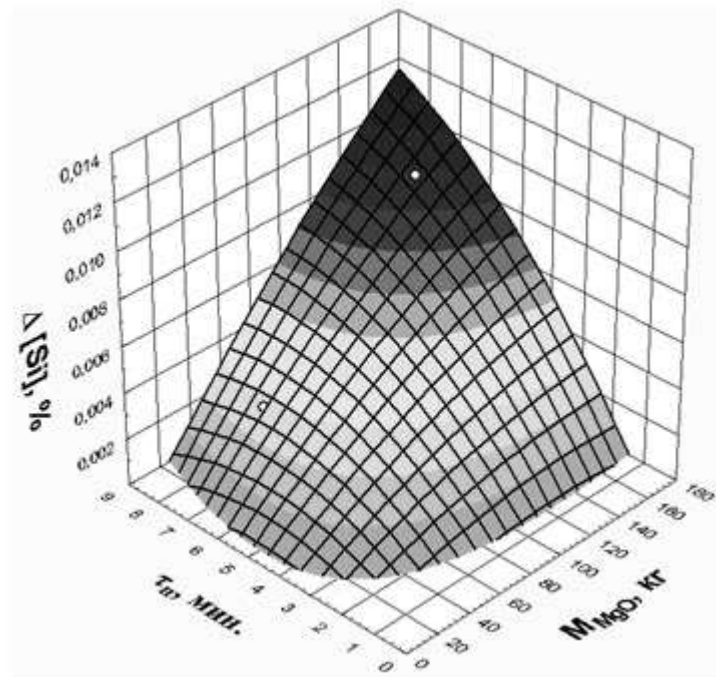


Рисунок 3.10 – Залежність зміни вмісту кремнію в сталі від витрати оксиду магнію і часу нагрівання металу

Таким чином, в результаті проведення дослідних плавок була доведена ефективність введення оксиду магнію в зону роботи дуги УКП для ініціації процесу силікотермії MgO і видалення надмірної кількості кремнію з металу. На всіх дослідних плавках було отримано зниження вмісту кремнію в сталі, вдалося уникнути перевищення максимальної межі за вмістом кремнію в готовій сталі, причому для двох плавок.

На підставі отриманих результатів були розроблені технологічні заходи щодо забезпечення необхідного вмісту кремнію в безкремністих низьковуглецевих сталях при їх обробці на УКП. При інтенсивному зростанні вмісту кремнію в сталі в ківш необхідно ввести оксид магнію у вигляді MgO -вмісного матеріалу (наприклад, магнезійний порошок). Кількість MgO визначається виходячи з попередньо отриманого аналізу ковшового шлаку, так як присадка додаткової кількості MgO не повинна негативно впливати на рафінуючі здатності шлаку. Введення MgO -вмісного матеріалу виробляють в зону роботи дуги, де досягаються необхідні для протікання процесу силікотермії термодинамічні умови. Після цього необхідно провести дуговий нагрів металу, причому тривалість нагріву повинна бути узго-

джена з температурними параметрами і тимчасовими обмеженнями позапічної обробки сталі. Дотримуючись цих умов і користуючись отриманою залежністю можна визначити кількість введеного оксиду магнію і час нагрівання, необхідні для необхідного зниження вмісту кремнію в сталі.

Як напрямки подальших досліджень необхідно відзначити дослідження впливу термодинамічних умов шлакової системи УКП на процеси відновлення і видалення кремнію, розробка математичної моделі для автоматизованих систем керування процесом позапічної обробки, що дозволяють визначити оптимальні параметри технологічного процесу в виробничих умовах.

3.2 Дослідження поведінки кремнію в системі шлак-метал при позапічній обробці автолистової сталі на УКП

У сучасних умовах розвитку металургійного комплексу України важливу роль набуває створення технологій, що забезпечують високу додану вартість і якість кінцевої продукції. Крім того, конкурентоспроможність вітчизняних підприємств в значній мірі визначається можливістю виробництва металу, який користується підвищеним попитом на внутрішньому і світовому ринках. Одним з таких видів продукції є сталі для виробництва автомобільного листа, які піддаються глибокої витяжки і штампуванню, які за останні роки освоєні на ряді підприємств.

Однією з найбільш серйозних проблем, що мають місце при виробництві сталей автолистової групи є отримання заданого вмісту кремнію в безперевнолитих слябах [34].

Аналіз технологічних параметрів виробництва таких сталей показав, що вміст кремнію безперевнолитій заготівці часто перевищує допустимі межі (0,02-0,03%), причому основний приріст вмісту кремнію в металі відбувається при його позапічній обробці на установці ківш-піч (УКП) в результаті протікання процесів алюміно- і карботермії з кремнезему рафінувального шлаку [35]. Оскільки джерелом кремнію, що переходить в сталь, є ковшовий шлак, завданням

даного дослідження було вивчення впливу фізико-хімічних властивостей цього шлаку на процеси відновлення і окислення кремнію. Відповідно до теорії шлакових розплавів при складі шлаку, наведеному в таблиці 3.14, термодинамічно переважніше утворення подвійних і потрійних сполук в системі $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [36]. З урахуванням фазового складу системи, показаного на діаграмі (рисунок 3.11), було встановлено, що весь кремнезем в шлаку буде зв'язаним в подвійні сполуки з CaO .

Таблиця 3.14 – Склад кінцевого шлаку УКП

компонент	CaO	Al_2O_3	SiO_2	MgO	FeO	MnO
вміст, %	56,2	24,0	12,1	5,6	1,3	0,8

У свою чергу, аналіз системи CaO-SiO_2 (Рисунок 3.12) показав, що при стандартних температурах позапічної обробки сталі (1550-1650 °C) в даній системі буде існувати хімічна сполука аліт 3CaO-SiO_2 . Утворення аліта призводить до значного зниження активності SiO_2 в шлаку і перешкоджає протіканню процесів відновлення кремнію з шлаку.

У той же час, при температурі близько 2070 °C, що досягається в області горіння електричної дуги УКП, відбувається інконгруентне плавлення аліта [37]. При цьому вивільняється SiO_2 , що є поверхнево-активним компонентом шлаку [38], концентрується на поверхні розділу шлак-метал, де створюються умови для протікання процесів відновлення кремнію з шлаку і його переходу в сталь [35].

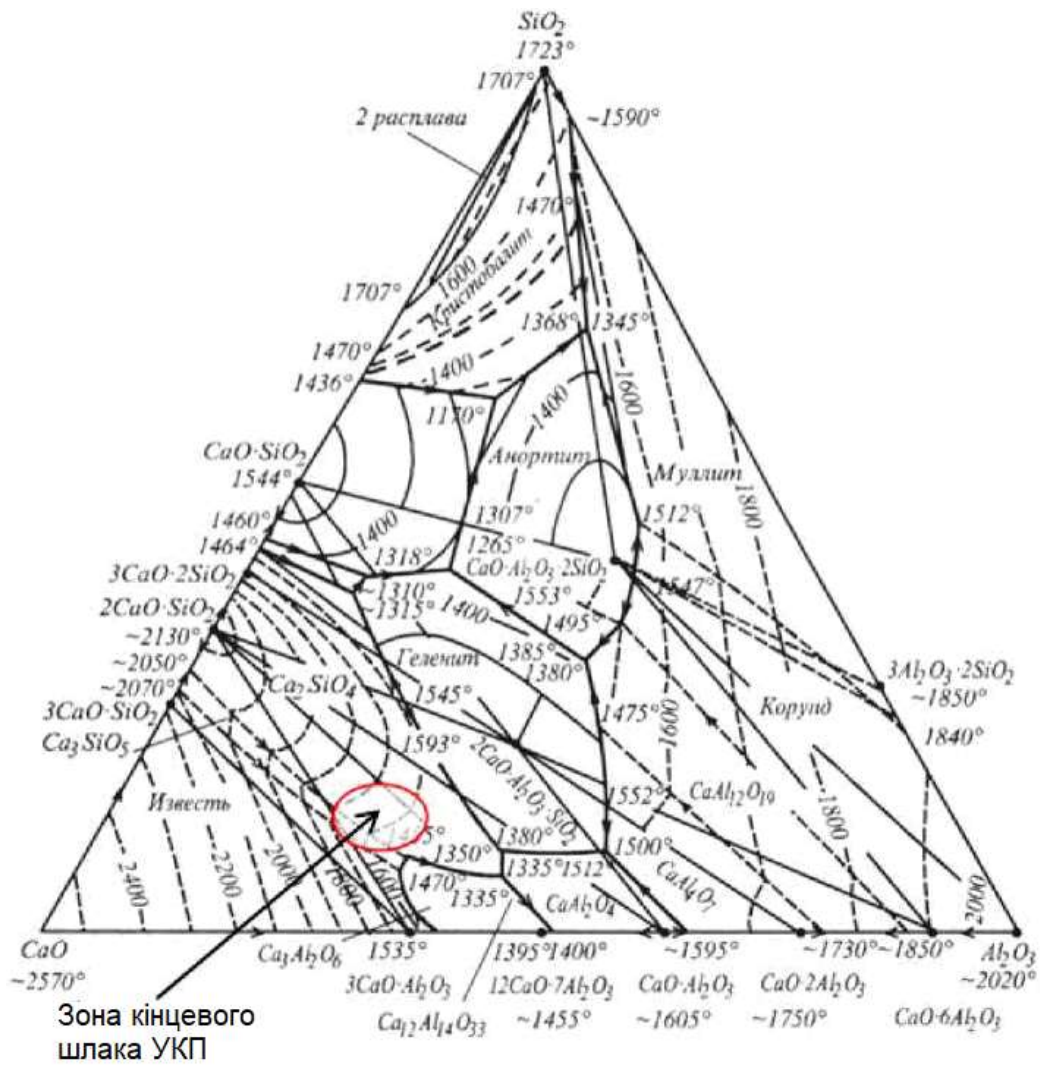


Рисунок 3.11 – Діаграма стану системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ [37]

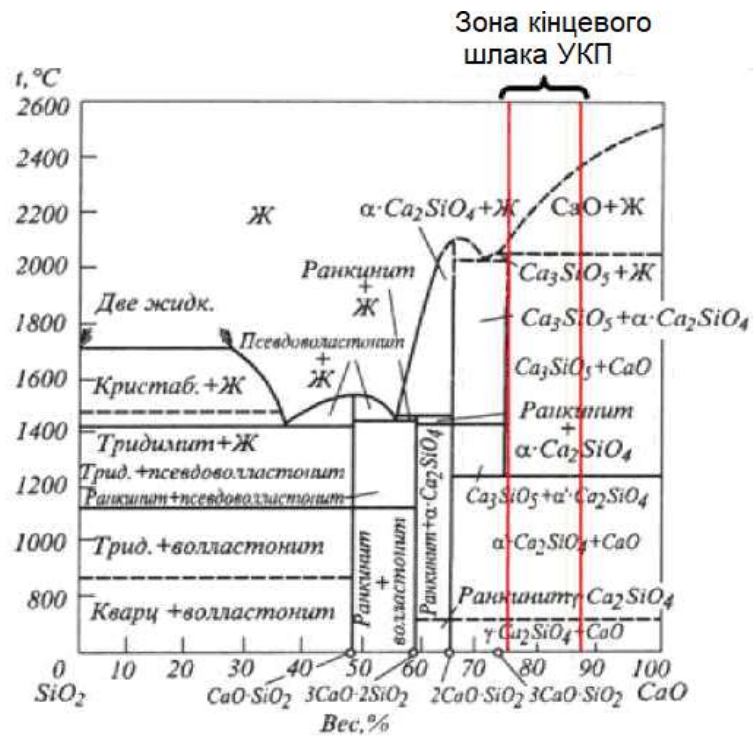


Рисунок 3.12 – Діаграма стану системи CaO-SiO_2 [5]

Для перевірки цієї теорії були проведені лабораторні дослідження, в ході яких вивчалася поведінка кремнію в системі метал-шлак при відсутності електродугового нагрівання. 10 зразків металу і шлаку, відібраних в кінці позапічної обробки автолистової сталі марки SAE 1006 на УКП, були поміщені в алундові тиглі.

У всіх дослідах маса металу склала 160 г, а маса шлаку 4 г, що відповідає співвідношенню мас металу і шлаку в сталерозливному ковші в реальних умовах. Тиглі зі зразками направляли в трубу криптолової печі (рисунок 3.13) і нагрівали до температури 1680 °С, характерною умовам позапічної обробки на УКП.

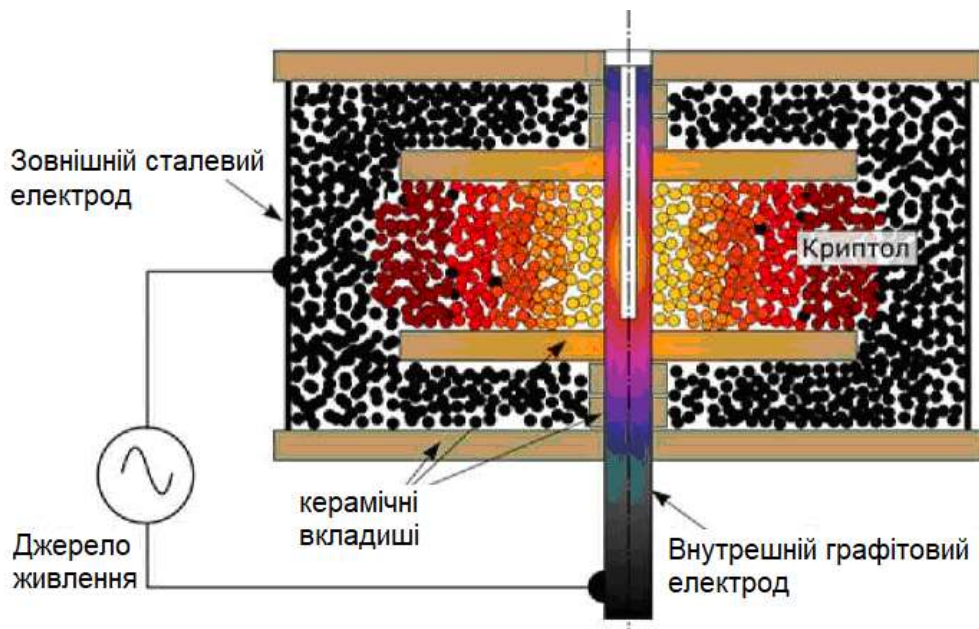


Рисунок 3.13 – Схема лабораторної криптолової печі

Для захисту металу і шлаку від взаємодії з окислювальним середовищем навколишнього повітря тиглі вводилися в піч за допомогою спеціальної оснастки, яка передбачає підведення захисного газу (аргону) в порожнисту вогнетривку підставку через патрубок, виконаний в підйомно-поворотному стенді печі і потім в трубу крізь отвір в підставці (Рисунок 3.14).

У кожному з десяти дослідів розплав металу і шлаку витримували в печі 20 хв., протягом яких проводили механічне перемішування розплаву несмочуваною алундовою паличкою для забезпечення усереднення розплаву.

Після закінчення дослідів зразки металу і шлаку охолоджували на повітрі, після чого проводили їх хімічний аналіз. Середній хімічний склад проб металу і шлаку до і після проведення дослідів приведений в таблицях 3.15 і 3.16.

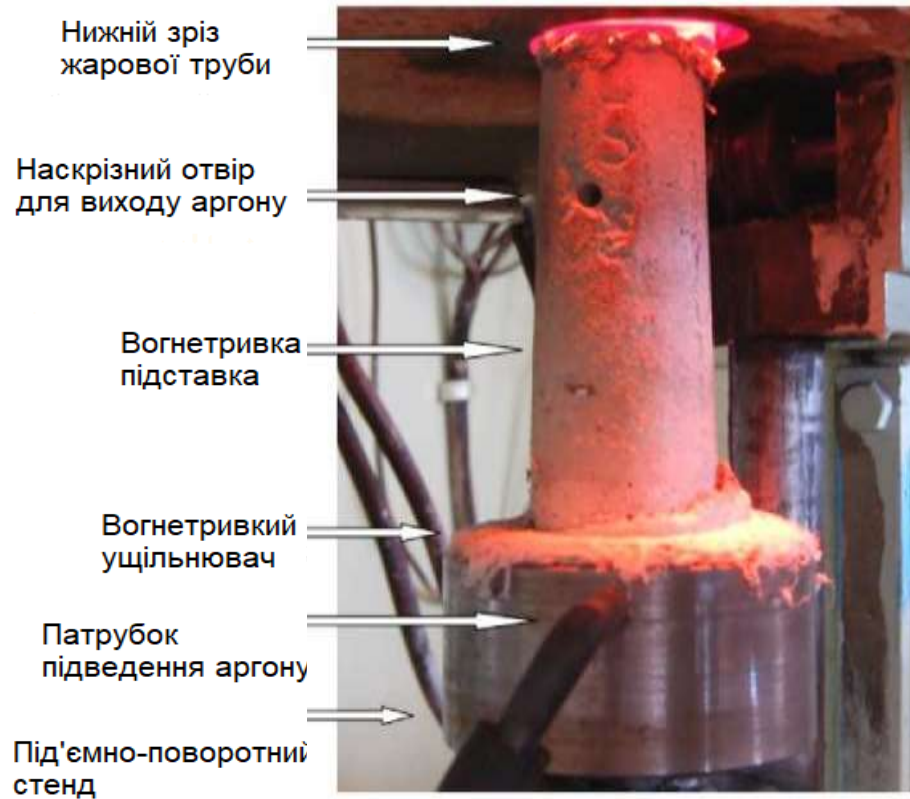


Рисунок 3.14 – Оснащення для введення тигля в піч

Таблиця 3.15 - Середній вихідний і кінцевий хімічний склад проб метала

компонент	C	Mn	Si	S	P	Al
Початковий, %	0,036	0,210	0,0090	0,011	0,007	0,024
Кінцевий, %	0,036	0,214	0,0105	0,010	0,007	0,015

Таблиця 3.16 - Середній вихідний і кінцевий хімічний склад проб шлаку

компонент	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	S	P ₂ O ₅
Початковий, %	0,93	8,12	56,15	5,90	0,31	28,07	0,49	0,03
Кінцевий, %	0,71	8,04	55,97	5,88	0,23	28,64	0,50	0,03

На підставі наведених даних був відзначений незначний приріст вмісту кремнію в сталі, причому, як видно з таблиці 3.15. Він обумовлений тільки процесом алюмінотермії кремнію з шлаку, так як вміст вуглецю в металі

залишився незмінним, а вміст алюмінію - зменшився. Розрахунок матеріального балансу дослідів показав, що алюміній, розчинений в металі, витратився на відновлення оксидів заліза, марганцю і кремнію, про що свідчить як зменшення їх кількості в покрівному шлаку, так і збільшення кількості (Al_2O_3) (таблиця 3.16).

За результатами дослідів з нагріванням металу і шлаку в криптоловій печі (при відсутності електродугового нагрівання) середнє значення приросту вмісту кремнію в сталі склав 0,0015% або 17% по масі, в той час як на дослідно-промислових плавках з нагріванням електричною дугою на УКП це значення складає 0,0131% або 168% по масі [35].

Крім того, було встановлено, що при стандартних температурах позапічної обробки відсутність відновлення кремнію обумовлено також низькою реакційною здатністю шлаку, пов'язаної з високим значенням крайового кута змочування кінцевого шлаку УКП. Кут змочування шлаку визначали методом лежачої краплі по стандартній методиці [39]. Зразки первинного і кінцевого шлаку поміщали на незмочувану підкладку і нагрівали в криптоловій печі до температури 1680 °С. Краплі шлаку в розплавленому стані фотографували і по отриманим знімкам вимірювали кут змочування.

На фотографіях зразків видно, що кут змочування первинного шлаку 160, а кінцевого - 105°. Для перевірки отриманих результатів були визначені розрахункові величини крайового кута змочування шлаків за формулою, запропонованою в роботі [40].

Результати дослідів і розрахунків наведені в таблиці 3.17.

Таблиця 3.17 – Фізико-хімічні властивості первинного і кінцевого шлаків УКП

параметр	Первинний шлак		кінцевий шлак	
	дослідна величина	розрахункова величина	дослідна величина	розрахункова величина
Щільність зразка, кг/м ³	3516	-	3562	-
Маса зразка, кг	0,002	-	0,002	-
Діаметр розтікання, м	0,033	-	0,014	-
Кут змочування, град	16	15,8	105	101,2
Поверхневий натяг, Н / м	0,619	0,634	0,580	0,612

З таблиці видно, що експериментальні дані достатньо добре узгоджуються з розрахунковими величинами, тому отримані результати є достовірними.

Таким чином, в результаті проведення лабораторних досліджень було доведено, що процес відновлення кремнію з рафінувального шлаку відбувається тільки в високотемпературній області електричної дуги УКП після розкладання аліта при температурі понад 2070 °С. Також за результатами вимірювання крайового кута змочування показано, що при відсутності дугового нагріву кінцевий шлак УКП має низьку реакційну здатність і масообмінні процеси між шлаком і металом (в тому числі відновлення кремнію) не отримують значного розвитку.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників у сталеплавильній лабораторії електросталеплавильного цеху

Оскільки лабораторія електросталеплавильного виробництва розташована на електросталеплавильному заводі, дослідники піддаються впливу небезпечних і шкідливих факторів, характерних для умов праці працівників заводу. Електросталеплавильне виробництво є галуззю підвищеної небезпеки. У процесі виплавки та розливання сталі металурги мають справу з рідким металом і шлаком та працюють при високих температурах. Вивчення металургійних процесів поблизу джерел тепла призводить до перегріву. Підготовка матеріалів і печей до плавлення, розливання, виплавки та розливання сталі вивільняє на робочому місці велику кількість пилу, променистої енергії, оксидів азоту, сірки та інших небезпечних матеріалів. Цех насичений електричними мостовими кранами, зарядними машинами та іншим електричним і механічним обладнанням, що може призвести до механічного та електричного ураження електричним струмом. Реальну небезпеку становлять механізми, що обертаються та рухаються. Продуктами плавки є сталь і шлак, що вивантажуються з печі, які становлять вибухо- і пожежонебезпеку, утворюють гази і підвищують тепловиділення.

Відповідно до класифікації [30], переважають такі небезпечні та шкідливі фактори

- Рушійні машини та механізми
- Рухомі частини виробничого обладнання;
- загазованість робочих зон під час продувки металів у ковшах аргоном;
- Виділення пилу на робочих місцях, де працюють з сипучими матеріалами.

Розбризування і викид рідкого металу під час переміщення сталерозливних ковшів і з проміжних ковшів; дроблення металу з ковшів.

Наслідки: опіки різного ступеня аж до повного згоряння працівників.

Вплив пилу на здоров'я людини залежить від його складу та джерела. Нетоксичний пил подразнює шкіру, очі та вуха. Дисперсність пилу впливає на його

поведінку. Чим вища дисперсність пилу, тим легше і швидше він проникає в організм людини. При вдиханні в легені потрапляють частинки пилу розміром 0,01-10 мкм, частинки розміром 0,01 мкм видихаються з повітрям, а частинки розміром 5-10 мкм осідають в носоглотці [31].

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого і трудового процесу в приміщенні лабораторії

№ п/п	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення (ПДК)	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови і характер праці			Тривалість дії фактора за зміну, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хім. речовини, мг/м ³ 1 клас небезпеки - озон II клас 3-4 клас небезпеки – оксиди азоту	0,1 5	0,6 8	3		0,5	75 75
2	Пил фіброгенної дії, мг/м ³	4	4				
3	Вібрація, дБ	107	109	2			90
4	Шум, дБ	55	60		5		75
5	Неіонізуюче випромінювання: - радіочастотний діапазон, В/м - діапазон пром.. частоти, кВ/м - оптич. діапазон (лаз.), Вт/м ²	20	35	15	-		80
6	Мікроклімат у приміщенні (у теплий період) : - Температура повітря, °С - Швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, %	23-25 0,1 40-60	26 0,3 60	- 1 0,2	- - -	- - -	90 90 90
7	Мікроклімат у приміщенні (у холодний період) : - Температура повітря, °С - Швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, %	22-24 0,1 40-60	23 0,1 55	- - -	- - -	- - -	90 90 90
8	Атмосферний тиск, мм. рт. ст.	760	752				90
	Напруженість праці	помірковано – напружена Категорія важкості – легка Ia					

Як видно з таблиці, відповідно до гігієнічної класифікації праці на умови праці інженера-дослідника у електросталеплавильному цеху найбільший вплив оказують такі фактори, як температура і вібрації.

4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища

Щоб запобігти травмуванню оператора, відстань від підлоги робочої платформи до нижньої частини рами навантажувача повинна бути не менше 600 мм, а відстань від бункера з наповнювачем - не менше 400 мм. Ходові колеса прес-підбирача повинні бути захищені кожухом, а зазор між рейками і кожухом не повинен перевищувати 10 мм. Навантажувачі повинні бути обладнані звуковою сигналізацією і миттєвим гальмом. Щоб уникнути вибуху, в плавильний бак не можна подавати мокрий матеріал. Для сушіння руди або бокситів повинна бути встановлена сушильна установка. З міркувань безпеки, якщо чавун подається вперед у ковшах, штабелеукладач або зчіпка повинні розташовуватися в передній частині поїзда. Швидкість руху поїзда не повинна перевищувати 4 км/год. При вивантаженні чавуну з ковша зливний ківш повинен розташовуватися на 100-150 мм нижче верху ковша, щоб уникнути розбризкування чавуну, а скрап повинен своєчасно очищатися і ремонтуватися.

Для забезпечення безпечних і сприятливих умов праці під піччю повинен мати ширину не менше 2,5 м. Від теплового випромінювання працівників захищають теплові екрани з водяним охолодженням. Огородження повинні бути знімними. Пульт управління встановлюється між стійками пічного прольоту, навпроти печі, і має функцію вентиляції. Для запобігання тепловому випромінюванню вікна пульта управління закривають товстим склом товщиною 10-15 мм.

Під час роботи необхідно носити передбачений спецодяг. Приступаючи до роботи, вони повинні бути належним чином одягнені і взуті, а спецодяг застібнутий на всі гудзики. Сталевари і підсобні робітники - суконний одяг, черевики, чоботи і каска (штани поверх черевиків, куртка поверх штанів, волосся підв'язане під косинку). Бригадири носять суконний одяг, рукавички, чоботи і каску. Залежно від характеру роботи та робочої зони слід використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) - захисні окуляри (від інфрачервоного випромінювання (сині) та пилу (білі)), беруші (від шуму), безклапанний респіратор "Пелюстка", протигаз

(від пилу та токсичних речовин), каска, рукавиці (для запобігання контакту з поверхнями, що нагріваються) [32].

Для захисту від впливу виробничого шуму на металургійних підприємствах використовуються шумопоглинаючі беруші з матеріалу FPP-S. Ці беруші ("вкладиші") призначені для носіння протягом одного дня. Також використовуються шумопоглинаючі навушники.

Захист від шуму і вібрації на заводі починається із забезпечення правильної щільності повітропроводів, газопроводів, клапанів, кришок печей і повітронагрівачів. Особливу роль в усуненні впливу шуму та вібрації відіграють автоматизація та механізація процесів [33].

Гумові рукавички та гумові килимки захищають від електричного струму та заземлюють усі металеві поверхні на робочому місці [34].

Для запобігання інфрачервоному випромінюванню на робочому місці робочі місця сталеливарників повинні бути обладнані тепловими водяними охолоджувальними екранами. Теплові екрани можуть локалізувати джерело променистого тепла, зменшити його вплив на робочому місці та знизити температуру поверхонь, що оточують робоче місце.

4.3 Заходи з електробезпеки

Вплив електричного струму може призвести до ураження електричним струмом або опіків. Ураження електричним струмом може бути спричинене контактом зі струмопровідними частинами обладнання. Опіки спричиняються електричною дугою, пов'язаною з процесом перемикання електричних ланцюгів.

Електричні мережі в цехах складаються з ізольованих проводів або кабелів із захисною оболонкою, які відповідають експлуатаційним вимогам механічної міцності і стійкості до впливу навколишнього середовища.

Напруга вище 250 В в мережах загального освітлення не допускається. Вертикальні та горизонтальні відстані від проводів до землі, транспортних шляхів, будівель та інших об'єктів нормуються. Мінімально допустима площа поперечно-

го перерізу проводу також визначена з точки зору механічної міцності та захисту від обриву проводу.

Для захисту від дотику струмоведучі частини повинні бути недоступними (на висоті, під підлогою або заховані в стінах). Мінімальна висота підвісу оголених електричних проводів становить 3,5 м (за винятком випадків, коли необхідна більша висота через можливий контакт з предметами з землі або транспортними засобами, що проїжджають повз), тоді як мінімально допустима відстань від проводу, що працює при напрузі 15 кВ, становить 0,7 м, а при напрузі 220 кВ - 3 м.

Оголені струмоведучі частини, до яких можуть торкатися люди, надійно огорожуються в безпечних приміщеннях, а при напрузі понад 65 В - в приміщеннях з напругою 36 В. При напрузі понад 250 В захищаються не тільки оголені частини, але й ізольовані струмоведучі частини проводів, що перебувають під напругою. Електрообладнання пофарбоване у встановлений колір. Це робиться не тільки для ідентифікації та естетичних цілей, але й виконує захисну роль, оскільки його ізоляційні властивості виключають або зменшують ризик утворення електричних ланцюгів через тіла працівників у разі аварії.

В якості захисної ізоляції можуть використовуватися електроізоляційні лаки, плівки, емалі та олійні фарби [34].

4.4 Заходи пожежної безпеки

Пічні прольоти електросталеплавильних цехів відносяться до категорії пожежної небезпеки Г, оскільки виробництво передбачає обробку негорючих матеріалів у гарячому розплавленому стані променистого тепла та полум'я, а як паливо використовується газоподібне паливо [35].

Будівлі побудовані зі сталі та залізобетону, які є вогнестійкими матеріалами. Цехи відносяться до 1-го класу вогнестійкості.

У цехах рідкий метал і шлак можуть прилипати до мокрої підлоги, ґрунту, матеріалів і конструкцій. Такі події зазвичай супроводжуються вибухами з викидом рідкого металу або шлаку.

Вибухи на колошнику дуже небезпечні, оскільки розкривається склепіння і гарячий кокс або газ викидається в робочу зону, запалюється і горить в атмосфері, утворюючи довге полум'я.

Заходи пожежної безпеки Для обмеження поширення вогню використовуються негорючі матеріали (азбест, спеціальна вата). У місцях входу газопроводу в підвал будівлі електросталеплавильного цеху встановлені дренажні системи, що запобігають потраплянню газу в ці приміщення.

Пожежна станція розташована на відстані 4 км від заводу.

Зовнішнє пожежогасіння в цехових приміщеннях електросталеплавильного цеху забезпечується кільцевою мережею з пожежними гідрантами та протипожежним водопроводом. Обсяг води, що використовується для пожежогасіння, становить 40 літрів на секунду, а кількість одночасних пожеж, що гасяться, - одна. Модульні автоматичні системи аерозольного та порошкового пожежогасіння (АСП) призначені для виявлення пожежі, оповіщення чергового про пожежу в приміщенні, подачі та розпилення вогнегасної речовини в межах захищуваних приміщень, локалізації та гасіння пожежі на початковій стадії.

Для евакуації людей з електросталеплавильного цеху в разі виникнення пожежі передбачені евакуаційні шляхи. Швидкість руху людей при вимушеній евакуації - 16 м/хв. Допустима довжина шляхів евакуації - не більше 50 м для одноповерхових виробничих будівель I і II ступенів вогнестійкості та для виробничих приміщень категорії А. Ширина евакуаційних шляхів і виходів повинна становити 0,6 м на 100 евакуйованих. Кількість запроектованих виходів повинна бути не менше двох (по можливості з протилежних сторін приміщення).

В якості технічних засобів пожежної сигналізації захищувані приміщення робочого місця повинні бути обладнані тепловими пожежними та димовими пожежними сповіщувачами марки Z-2000-SMK.

На зовнішніх виходах повинні бути встановлені ручні пожежні сповіщувачі наступного виробника: "БолідІПР-513-3А (сповіщувач пожежний ручний).

Система пожежної сигналізації призначена для виявлення пожежі та забезпечення звукової та візуальної сигналізації про спрацювання пожежного сповіщувача.

4.5 Технічні рішення виробничої санітарії

4.5.1 Опалення та вентиляція цеху

Пічні прольоти на електросталеплавильних заводах генерують велику кількість надлишкового тепла, що вимагає значного повітрообміну, особливо в літні місяці.

Вентиляція досягається шляхом переміщення забрудненого повітря з приміщення і надходження свіжого повітря в приміщення; на природний повітрообмін у виробничих приміщеннях електросталеплавильного цеху впливають два фактори: різниця температур, що створює тепловий тиск, і вітер, що створює вітровий тиск.

Таблиця 4.2 – Значення прийнятих припустимих (оптимальних) параметрів повітряного середовища в робочій зоні виробничих приміщень

Характеристика вироб. приміщень по надлишковим тепловиділенням	Категорія роботи	Період року (теплий, холодний) На постійних робочих місцях			Температура повітря поза постійними робочими місцями, °C
		$T_{\text{повітря}}, ^\circ\text{C}$	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с	
Більш 23 Вт/м ³	Важка -3	15-26(18-20)	75(40-60)	0,2-0,6(0,4)	15-25(20)
		13-19(16-18)	75(40-60)	не більш 0(0,1)	0-10(10)

В електросталеплавильному цеху в зовнішніх стінах передбачені отвори для надходження зовнішнього повітря, висота яких внизу отворів становить 2 м. Для збільшення теплового тиску в будівлі заводу встановлені витяжні шахти. Для збільшення повітрообміну за рахунок тиску вітру у витяжних шахтах встановлені дефлектори. Таке розташування отворів необхідне для збільшення повітрообміну

влітку (шляхом відкриття обох рядів отворів) і для зменшення повітрообміну взимку шляхом закриття нижніх отворів, щоб тепло з приміщення нагрівалося до того, як досягне робочої зони.

У секторі позапічної обробки спостерігається інфрачервоне випромінювання 1000 Вт/м^2 , що перевищує гранично допустимий рівень випромінювання.

До складу захисних засобів від випромінювання входить: застосування спеціального одягу, що складається із сукняного костюма і захисних окулярів темно-синього кольору, черевиків, рукавиць і каски; виконання інструкцій, під час переливу рідкого металу забороняється перебування працівників у небезпечній зоні (радіусом 5-6 м).

4.5.2 Освітлення виробничих приміщень

Пічний проліт електросталеплавильного заводу отримує природне і штучне освітлення.

Для природного освітлення в стінах будівлі заводу передбачені світлові ліхтарі. Площа віконного прольоту становить 20% від площі підлоги. Нормативне значення коефіцієнта природного освітлення - 1% [36].

При недостатньому природному освітленні використовується штучне освітлення з мінімальною інтенсивністю 300 лк відповідно до норм освітленості для штучного освітлення. Штучне освітлення забезпечується лампами розжарювання типу НБ потужністю 60 і 100 Вт та типу НГ потужністю 500 Вт. Світлова віддача ламп зростає зі збільшенням потужності, але ніколи не перевищує 18 лм/Вт.

Установка характеризується наявністю освітлених об'єктів (полум'я, розплавлений і нагрітий метал, шлак) в полі зору оператора. Яскравість нагрітого металу коливається від 71500 до 112000 ніт. Умови роботи вимагають дивитися на поверхню, що світиться, щоб контролювати процес і візуально судити про температуру, якість металу і шлаку тощо.

Тому яскравість адаптованої зони повинна бути постійною (тобто постійний рівень освітленості на навколишніх предметах).

Освітленість на ділянці допускається до 5 люкс. Живлення системи освітлення планується від проектної електромережі 380/220 В робочого місця. Коефіцієнт запасу для світильників за запиленістю становить 1,7 [36].

Відповідно до норм роботи з матеріалами та виробами, що світяться, в гарячих цехах мінімальний розмір об'єктів, що підлягають ідентифікації, становить 0,5 мм і більше. Розряд зорової роботи за цих умов - VII. Коефіцієнт природної освітленості при комбінованому освітленні становить $E_n = 2,7 \%$, а при нормальному освітленні - $E_n = 0,9 \%$ [36].

4.5.3 Санітарно-побутові приміщення

Велике значення для нормалізації роботи працівників електросталеплавильних цехів в умовах значного тепловиділення має раціональний режим праці та відпочинку, що включає регламентовані перерви, облаштування кімнат відпочинку з кондиціонерами та водні процедури, такі як напівдуш, умивання та обтирання [37].

Час безперервної роботи в умовах надмірної спеки не повинен перевищувати 10 хвилин; після другої години роботи необхідна 15-хвилинна перерва, яку слід робити в кімнаті відпочинку.

Протягом перших двох-трьох тижнів молоді працівники та працівники після хвороби або відпустки повинні виконувати роботу легкої та середньої тяжкості з поступовим збільшенням навантаження, щоб забезпечити адаптацію до умов праці. 8-10-хвилинні перерви обов'язкові, які слід робити в кімнаті відпочинку.

Кімнати відпочинку повинні бути закритими та звукоізольованими (рівень шуму нижче 50 децибел), обладнаними кондиціонерами, автоматами ОМ-1 для кисневої профілактики, напівдушовими кабінами та кріслами для зручних поз для розслаблення м'язів.

Поряд з іншими заходами щодо зниження інтенсивності впливу технічних, планувальних, технологічних і виробничих небезпек, велика увага приділяється також заходам щодо підвищення фізичної стійкості працівників до їх впливу. Ці

заходи реалізуються в рамках медико-санітарного обслуговування працівників і включають

а) медичні огляди працівників, зайнятих на роботах зі шкідливими умовами праці (попередні при прийнятті на роботу та періодичні протягом трудової діяльності)

б) лікувально-профілактичне харчування

в) застосування адаптогенів, тобто лікарських засобів природного походження, спрямованих на патогенетичну профілактику несприятливих наслідків, викликаних факторами виробничого середовища.

Для підтримки вітамінного балансу в організмі працівників електросталеплавильних заводів рекомендується вживання вітамінізованого чаю та молочнокислих напоїв. Питні пункти повинні бути розташовані поруч з робочим місцем. Харчування працівників має бути різноманітним і багатим на вітаміни.

Для підвищення стійкості організму до перепадів температур, застуди та інших захворювань рекомендується використання таких оздоровчих засобів, як гідротерапія (сауни, басейни, душові та обмивання), інгаляції та фізіотерапевтичні кабінети.

4.5.4 Виробничий шум

Спеціальні будівельні рішення, конструкції та обладнання не передбачаються, оскільки рівень шуму пічних прольотів на електросталеплавильних заводах не перевищує 80 дБ і граничні рівні шуму згідно з [38] не перевищуються. Шум може викликати загальнобіологічні зміни, функціональні порушення, втрату слуху, механічні пошкодження, що призводять до професійних захворювань, таких як розриви барабанних перетинок (при 120-140 дБ), серцево-судинні зміни та шлунково-кишкові розлади.

Джерелами шуму на території заводу є дугові печі, технологічне обладнання (наприклад, мостові крани, насоси, навантажувачі) та форсунки вантажних автомобілів, які випускають кисень зі швидкістю звуку.

Для зниження рівня шуму на території заводу було вжито таких заходів

- Для зниження рівня шуму агрегати ізольовані в спеціальних укриттях, що дозволяє знизити рівень шуму поблизу технологічного обладнання;
- Вентиляційне обладнання розташоване в окремому приміщенні та за межами будівлі електросталеплавильного цеху;
- Вентилятори встановлені на віброізоляційних основах і з'єднані з повітроводами через гнучкі вставки;
- Використання звукопоглинальних матеріалів на стінах;
- Використання засобів індивідуального захисту (спеціальні каски, спеціально розроблені звукоізоляційні телефони (звукоізоляційні вкладиші, беруші)).

4.5.5 Засоби індивідуального захисту

В якості засобів індивідуального захисту сталевари повинні використовувати спецодяг з негорючих, стійких до радіаційного випромінювання, легких і повітропроникних матеріалів (тканина, брезент, хімічно оброблені волокна з металевим покриттям) відповідно до [32]. Для захисту очей слід використовувати багаточарові світлофільтри у вигляді окулярів та щитків.

Для захисту органів дихання від пилу слід використовувати респіратор (пелюстка). Для захисту органів слуху від шуму використовуйте беруші. Для захисту очей від впливу променевої енергії носити захисні окуляри зі світлофільтрами. При роботі біля печі використовуються окуляри SS4 і SS11. Окуляри надягають на козирок або головний убір (каска). Виготовляються зі спеціального скла жовто-зеленого або синього кольору. Необхідні спеціальні шкіряні черевики.

Спеціальні чоботи невидимі спереду і підбиті еластичною піною або шарами бавовняної тканини. Підшви хромовані.

Зона відпочинку відокремлена від виробничої зони скляним блоком, площею 2-3 м і висотою 2,3 м. Стеля має природні вентиляційні отвори для усунення повітряних теплових подушок.

Висновки

1. Макроструктура безкремністої шарикопідшипникової сталі така ж, як і вакуумованої сталі в ковші і розкисленої під вакуумом.
2. У злитку безкремністої сталі відсутня зональна ізоляція («вуса»), що вказує на менший вміст газів в сталі до моменту її кристалізації.
3. Забрудненість оксидами безкремністої сталі, розкисленої алюмінієм в центровій така же, що і сталі розкисленої феросиліцієм і алюмінієм під вакуумом в ковші. При розкисленні безкремністої сталі алюмінієм в виливниці забрудненість її оксидами збільшується. У безкремністій сталі міститься найменша кількість глобулярних включень.
4. В результаті металографічних і механічних випробувань безкремністої сталі встановлені більш високі властивості вакуумованої безкремністої підшипникової сталі, ніж у сталі, виплавленої за класичною технологією.
5. В результаті проведення дослідних плавок була доведена ефективність введення оксиду магнію в зону роботи дуги УКП для ініціації процесу силікотермії MgO і видалення надмірної кількості кремнію з металу. На всіх дослідних плавках було отримано зниження вмісту кремнію в сталі, вдалося уникнути перевищення максимальної межі за вмістом кремнію в готової сталі, причому для двох плавок.
6. В результаті проведення лабораторних досліджень було доведено, що процес відновлення кремнію з рафінувального шлаку відбувається тільки в високотемпературній області електричної дуги УКП після розкладання аліта при температурі понад 2070 °С. Також за результатами вимірювання крайового кута змочування показано, що при відсутності дугового нагріву кінцевий шлак УКП має низьку реакційну здатність і масообмінні процеси між шлаком і металом (в тому числі відновлення кремнію) не отримують значного розвитку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Смірнов О. М., Зборщик О. М. Позапічне рафінування чавуну і сталі : навчальний посібник. Донецьк : Ноулідж, 2013. 179 с.
2. Меджибожський М. Я., Харлашин П. С. Теоретичні основи сталеплавильних процесів: навч. посібник. Київ: НМК ВО, 1993. 276 с.
3. Мовчан В. П., Бережний М. М. Основи металургії. Дніпропетровськ : Пороги, 2001. 334 с.
4. Смірнов О. М., Макуров С. Л., Сафонов В. М. Виробництво зливків сталі та промислових сплавів : навч. посіб. Донецьк : Ноулідж, 2013. 405 с.
5. Охотський В. Б. Феноменологія сталеплавильних процесів : навч. посіб. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2011. 90 с.
6. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі : теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія : підручник для вузів. Дніпропетровськ : РВА "Дніпро-VAL", 2004. 453 с.
7. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів. Київ : Кондор, 2006. 528 с.
8. Готвянський Ю. Я. Фізико-хімічні та металургійні основи виробництва металів : навч. посіб. Київ : ІЗМН, 1996. 392 с.
9. Харлашин П. С. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з дисципліни «Фізико-хімічні основи виробництва чистих металів». Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2009. 14 с.
10. Харлашин П. С. Чаудрі Т. М., Меджибожський М. Я. Основи термодинаміки і кінетики сучасних сталеплавильних процесів : підручник для ВУЗів. Маріуполь, 2009. 340 с.
11. Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість) : підручник / Харлашин П.С. та ін. Донецьк : ТОВ «Норд-комп'ютер», 2005. 724 с.
12. Наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

13. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 (НПАОП 40.1-1.01-97) ПРАВИЛА безпечної експлуатації електроустановок.
14. СНиП 2.01.02-85*. Протипожежні норми (Діє ДБН В 1.1-7-2002) (2.01.02-85*) (СНиП 2.01.02-85*. Противопожарные нормы (Действует ДБН В 1.1-7-2002)).
15. ДБН В.2.5-28-2006 Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення.
16. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.
17. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний університет
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні



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

17-20 жовтня 2023 року



УДК 669.1

Кириченко О.Г., к.т.н., доц., Хвостов В.Р., магістрант 2 курсу,
Євтушенко Д.С., ЗдВО 2 курсу,
Науковий керівник – к.т.н., доцент Кириченко О.Г.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ БЕЗКРЕМНІСТОЇ КОНВЕРТЕРНОЇ СТАЛІ

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

Однією з найбільш серйозних проблем, що мають місце при виробництві високоякісних сталей, є отримання заданого вмісту кремнію.

Встановлено, що зниження в конструкційних сталях вмісту кремнію менш і проведення вакуумного вуглецевого розкислення справляють істотний позитивний вплив на процеси дегазації рідкого металу, розподіл домішок і формування первинної кристалічної структури при затвердінні. Найбільш позитивно ці процеси проявляються при кристалізації великих мас металу, приводячи до підвищення пластичності металу, зниження його схильності до крихкого руйнування. Розроблено перспективні варіанти комплексної технології виробництва злитків (в тому числі і великі) з безкремністої сталі.

Дослідження розподілу домішок при затвердінні дозволили виділити основні фактори, що впливають на формування позацентральної хімічної неоднорідності. Показано, що розкислення робить істотний вплив на термодинамічні і кінетичні умови утворення сульфідів.

Встановлено, що кремній є чинником, що впливає практично на всі параметри хімічної неоднорідності: коефіцієнт розподілу, висоту, ширину і питомий об'єм зони ліквацийних шнурів.

Характерно, що зони шнурів в металі з вмістом кремнію $<0,1\%$ практично зникають навіть при концентрації сірки $\sim 0,01\%$.

Дослідження осьових темплетів злитків свідчать про те, що знижений вміст кремнію поряд з глибоким рафінуванням металу від шкідливих домішок забезпечують підвищену рівномірність розподілу хімічних елементів по перетину поковок, високу однорідність сірчаних відбитків, низький вміст неметалевих включень і газів.

Застосування сталі з вмістом кремнію $<0,1\%$ дозволили отримати кований метал з дуже високим рівнем фізико-механічних характеристик, включаючи в'язкість руйнування і опір крихкому руйнуванню.

Дослідження розподілу домішок при затвердінні дозволили виділити основні фактори, що впливають на формування позацентральному хімічної

неоднорідності. Показано, що розкислення робить істотний вплив на термодинамічні і кінетичні умови освіти сульфідів і розвиток ліквацийних шнурів. Запропоновано механізм впливу розкислювачів на утворення сульфідів. При зменшенні активності кисню від 40 до 8 ppm тип сульфідів змінюється від першого до другого і потім до третього. Експериментально також показано, що умови, характерні для виділення сульфідів другого типу, є сприятливими для освіти та сталого розвитку шнурів позацентритної ліквациї.

Встановлено, що кремній є чинником, що провокує розвиток дендритної і зональної позацентритної ліквациї, впливаючи практично на всі параметри хімічної неоднорідності: коефіцієнт розподілу, висоту, ширину і питомий об'єм зони шнурів.

Характерно, що зони шнурів в металі з вмістом кремнію $<0,1\%$ практично зникають навіть при концентрації сірки $\sim 0,01\%$ при масі зливка 40-50 т.

Проведено відпрацювання найбільш раціональних технологічних схем виробництва великих злитків масою 30-420 т для заготовок відповідального призначення в промислових умовах, оснащених різними сталеплавильними агрегатами й установками для позапічної обробки сталі.

Дослідження осьових темплетів злитків, розширені випробування відповідальних заготовок зварних і цільнокованих роторів турбін і турбогенераторів свідчать про те, що використання вакуумного вуглецевого розкислення (ВУР) і зниженого вмісту кремнію поряд з глибоким рафінуванням металу від шкідливих домішок забезпечують підвищену рівномірність розподілу хімічних елементів по перетину поковок, високу однорідність сірчаних відбитків, низький вміст неметалевих включень і газів.

Розроблено та здійснено оригінальна технологічна схема виробництва ковальських злитків масою до 50 т з розливанням у аргонівій камері. Застосування сталі з вмістом кремнію $<0,1\%$, проведення ВУР на УЦВС і строго дозоване розкислення алюмінієм дозволили отримати кований метал з дуже високим рівнем фізико-механічних характеристик, включаючи в'язкість руйнування і опір крихкому руйнуванню.

Можна зробити висновок про перспективність безкремністої сталі і при виробництві злитків меншої маси і слябів УБРС, особливо для виробів відповідального і довготривалого застосування.

Таким чином, в результаті проведення лабораторних досліджень було доведено, що процес відновлення кремнію з рафінувального шлаку відбувається тільки в високотемпературній області електричної дуги УКП після розкладання аліта при температурі понад 2070°C . Також за результатами вимірювання кута змочування показано, що при відсутності дугового нагріву кінцевий шлак УКП має низьку реакційну здатність і массообмінні процеси між шлаком і металом (в тому числі відновлення кремнію) не отримують значного розвитку.

В ході подальших досліджень планується встановити вплив зміни вмісту компонентів рафінувального шлаку УКП на його фізико-хімічні властивості з метою удосконалення шлакового режиму позапічної обробки автолистових сталей. Можна зробити висновок про перспективність безкремністої сталі для виробів відповідального і довготривалого застосування.