МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проєкт

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему **Дослідження технології вакуумування сталей типу ШХ**

Виконав: студент II курсу, групи 8.1364-мчм
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Металургія чорних металів
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
С.М.Мороз
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.х.н., проф. Прутцьков Д.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент проф., д.т.н., проф. Бєлоконь Ю.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

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_____
«_____»_____20____року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Морозу Сергію Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Дослідження технології вакуумування сталей типу ШХ

керівник роботи Прутцьков Дмитро Володимирович, д.х.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «27» лютого 2025 року №319-с

2 Строк подання студентом роботи 08.12.2025

3 Вихідні дані до роботи Дослідити технологічні особливості вакуумування шарикопідшипникових сталей

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат; вступ; Загальні відомості про шарикопідшипникову сталь; Методика проведення досліджень; Дослідження процесу вакуумування сталі типу ШХ; Охорона праці та техногенна безпека; Висновки; Перелік джерел посилання; Додаток А

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

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Загальні відомості про шарикопідшипникову сталь	Прутцьков Д.В,, професор		
Методика проведення досліджень	Прутцьков Д.В,, професор		
Дослідження процесу вакуумування сталі типу ШХ	Прутцьков Д.В,, професор		
Охорона праці та техногенна безпека	Прутцьков Д.В,, професор		

7 Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, реферат	21.11-25.11.2025	
2	Загальні відомості про шарикопідшипникову сталь	26.11-30.11.2025	
3	Методика проведення досліджень	01.12-03.12.2025	
4	Дослідження процесу вакуумування сталі типу ШХ	04.12-06.12.2025	
5	Охорона праці та техногенна безпека	06.12-08.12.2025	
6	Висновки, перелік джерел посилання	08.12.2025	

Студент _____ _____С.М.Мороз_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ _____Д.В.Прутцьков_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____Ю.О.Бєлоконь___
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 100 с., 34 табл., 21 рис., 1 дод., 24 джерела

ШАРИКОПІДШИПНИКОВА СТАЛЬ, ВАКУУМУВАННЯ, КОНЦЕНТРАЦІЯ, НЕМЕТАЛЕВІ ВКЛЮЧЕННЯ, ХІМІЧНИЙ СКЛАД, КІНЕТИКА, РОЗПЛАВЛЕННЯ, КИПІННЯ

Об'єкт дослідження – процес виробництва та позапічної обробки шарикопідшипникових сталей.

Предмет дослідження – закономірності і механізми фізико-хімічних процесів вакуумування шарикопідшипникових сталей та їх вплив на якість кінцевого продукту.

Мета роботи – дослідити фізико-хімічні особливості процесу вакуумування шарикопідшипникових сталей з метою вдосконалення технології та можливості регулювання процесу.

Методи дослідження – металографія, хімічний та мікроскопічний аналізи, статистичний метод, математичний аналіз.

Наукова новизна:

1. Встановлено, що для отримання сталі чистої за оксидними включеннями необхідно виключити утворення продуктів розкислення з рідкої ванні. Для цього найбільш доцільним є попереднє видалення кисню за рахунок реакції з вуглецем в вакуумі з тим, щоб при остаточному розкисленні сталі феросплавами утворилася мінімальна кількість включень.

2. Експериментально доведено, що перед вакуумуванням метал не повинен містити в розчині сильних розкислювачів, наприклад кремнію і алюмінію. Такий метал при вакуумуванні повинен зазнавати глибоке розкислення за рахунок розчиненого вуглецю і одночасно, внаслідок енергійного кипіння, звільнятися від інших газів.

Практичне значення:

1. Створена нова технологія виплавки шарикопідшипникової сталі, яка забезпечила підвищення якості шарикопідшипникової сталі, зниження балів оксидних і глобулярних включень в ній і значну економію феросплавів.

2. Для інтенсифікації процесу десульфурації сталі в окислювальному і в відновлювальному періодах застосовували метод продувки рідкої ванни порошками (80% CaO + 20% CaF_2) із застосуванням в якості газу, що несе, азоту або компресорного повітря під тиском 4-5 атм.

3. Запропоновано використовувати при розкисленні ФС-45 замість ФС-75. При розкисленні 45%-им феросиліцієм кремній розподіляється більш рівномірно, ніж при розкисленні 75%-им; коефіцієнт варіації (коливання) на плавках, де використовувався 45%-ий феросиліцій, становить 23,3%; проти 36,1% для плавок з розкисленням металу 75%-им феросиліцієм. Дещо зменшився бал глобулярних включень в металі, розкисленому 45%-ним феросиліцієм, що пов'язано з меншим чадом кремнію.

У вступі обґрунтований обраний напрям досліджень, визначені мета та шляхи його досягнення.

У розділі 1 наведені загальні положення про шарикопідшипникову сталь, а саме призначення, види та область її застосування; хімічний склад та основні властивості сталі; наведена загальна характеристика різних способів виплавки та розливки; та проведений вибір нових прогресивних розробок щодо технології виплавки шарикопідшипникових сталей.

У розділі 2 наведено матеріали та методи дослідження, які використовувалися в роботі.

У розділі 3 досліджено використання вакууму при виплавці шарикопідшипникових сталей; запропонована установка для вакуумної обробки рідкої сталі; та проведені експерименти по вакуумуванню розкисленого металу в ковші; наведено опис та короткий аналіз нової технології плавки; досліджено якість вакуумованої сталі; встановлено вплив окремих факторів на забрудненість сталі включеннями.

У розділі 4 «Охорона праці та техногенна безпека» розглянуті питання охорони праці та техногенної безпеки, дається характеристика шкідливих умов виробництва, санітарно-гігієнічних умов праці, описані заходи, які забезпечують комфортні умови праці.

ЗМІСТ

Вступ…… 8
1 Загальні відомості про шарикопідшипникову сталь 10
1.1 Призначення, види і сфера застосування шарикопідшипникової сталі 10
1.2 Хімічний склад шарикопідшипникової сталі 11
1.3 Загальні вимоги щодо включень у шарикопідшипниковій сталі 16
1.4 Загальні особливості методів виробництва шарикопідшипникової сталі. 20
1.4.1 Виплавка в електродугових печах 21
1.4.2 Спеціальні способи виплавки 21
1.4 Аналітичний огляд літератури з питань технології, способів виплавки і розливання шарикопідшипникової сталі за останні роки 21
1.5 Вибір і застосування сучасних прогресивних розробок у технології виплавки сталей для шарикопідшипників 24
1.6 Загальні відомості про процес вакуумування сталі 26
2 Методика проведення досліджень 29
3 Дослідження процесу вакуумування сталі типу ШХ 32
3.1 Дослідження вакуумування розкисленого металу в ковші 32
3.2 Опис і стислий аналіз дослідної методики плавки підшипникової сталі з використанням вакууму 42
3.3 Дослідження процесу вакуумування рідкого металу в ковші 45
3.4 Якість вакуумованої шарикопідшипникової сталі 53
3.5 Вплив окремих чинників процесу вакуумування на забрудненість сталі включеннями 60
3.6 Шляхи вдосконалення нової технології 67
4 Охорона праці та техногенна безпека 76
4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників у сталеплавильній лабораторії електросталеплавильного цеху 76
4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища 78

4.3 Заходи з електробезпеки 79
4.4 Заходи пожежної безпеки 80
4.5 Технічні рішення виробничої санітарії 82
4.5.1 Опалення та вентиляція цеху 82
4.5.2 Освітлення виробничих приміщень 83
4.5.3 Санітарно - побутові приміщення 84
4.5.4 Виробничий шум 85
4.5.5 Засоби індивідуального захисту 86
4.6 Розрахунок межі вогнестійкості суцільних конструкцій при односторонньому обігріві (за ознакою прогріву) 87
Висновки 90
Перелік джерел посилання 93
Додаток А Публікації за темою кваліфікаційної роботи 95

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 постійного вивчення і вдосконалення.

Підшипники є відповідальними деталями багатьох машин (верстатів, автомобілів, тракторів, вагонів, електродвигунів та ін.), що визначають їх точність і продуктивність. Підшипники працюють в умовах обертання кульок (або роликів) по зовнішньому і внутрішньому кільцях. Найбільш часто причиною відмови підшипників є злам, руйнування тіл обертання і робочих поверхонь кілець, а також утомлююче викришування робочих поверхонь елементів підшипника.

Для їх виготовлення зазвичай використовують високовуглецеву хромисту сталь ШХ15 (0,95-1,05% C і 1,3-1,65% Cr), а великого перерізу - хромомарганцевокремністу сталь ШХ15СГ (0,95 - 1,05% C, 0,9-1,2% Cr, 0,4-0,65% Si і 1,3-1,65% Mn), яку прожарюють на велику глибину. Сталі мають високу твердість, зносостійкість і опір контактної втоми. До сталей висувають високі вимоги щодо утримання неметалічних включень, так як вони викликають передчасне втомне руйнування.

Мета роботи - дослідити фізико-хімічні особливості процесу вакуумування шарикопідшипникових 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 вакуумування шарикопідшипникових 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. розробка установки для вакуумної обробки рідкої сталі;
4. розробка та дослідження нової технології плавки з вивченням процесу вакуумування рідкого металу в ковші;
5. дослідження якості вакуумованої шарикопідшипникової сталі та вплив окремих чинників процесу вакуумування на забрудненість сталі включеннями;

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ШАРИКОПІДШИПНИКОВІ СТАЛІ

1.1 Призначення, типи та сфери застосування шарикопідшипникової сталі

Шарикопідшипникова сталь використовується переважно для виготовлення кульок, роликів і кілець підшипників. Її номенклатура охоплює широкий спектр марок сталі, що пояснюється різноманітними вимогами до експлуатаційних характеристик підшипників у традиційних і нових галузях промисловості та сільського господарства.

Підшипникові високовуглецеві сталі можна поділити на кілька типів:

- Сталі для підшипників, які працюють у стандартних умовах (хромисті, хромисті з додаванням молібдену, хромомарганцевокремнисті, хромомарганцеві з молібденом).

- Сталі для підшипників, що працюють у агресивних середовищах та за високих температур (корозійностійкі, жаростійкі).

До першої групи належать марки сталі, такі як ШХ15, ШХ15СГ, ШХ20СГ, ШХ4, ШХ6, ШХ9 тощо, причому останні дві марки були замінені сталлю ШХ15 внаслідок проведеної уніфікації. Їхні аналоги у зарубіжних виробників мають такі позначення: 52100, 100C6, SKF - 24, SUJ2 і подібні.

До другої групи входять сталі, наприклад 95Х18-Ш (буква "Ш" вказує на виплавку методом електрошлакової переплавки; вакуумно-дугова переплавка позначається як "ШД"), 11Х18М-ШД, ЕИ760, ЕИ347 (8Х4В9Ф2), 8Х4М4ВФ1-Ш, а також іноземні марки 8DCV40, M50, Z80WDCV6, 80MoCrV4216 тощо.

Окрім цього, широко використовуються низьковуглецеві цементовані сталі й обмежено — сплави з особливими фізичними властивостями. Вибір сталі для конкретного підшипника залежить від його розмірів і умов експлуатації. Підшипники з хромистої та хромомарганцевокремнистої сталі здатні функціонувати при температурах у межах від 60 до 300 °С. Якщо температура перевищує 100 °С, деталі підшипника потребують спеціальної термічної обробки для забезпе-

чення стабільності розмірів. Це супроводжується зниженням твердості сталі, що впливає на стійкість до контактної втоми.

У межах заданого температурного діапазону вибір між хромистою та хромомарганцевокремнієвою сталлю залежить від товщини стінок кілець або діаметра тіл кочення. Кремній і марганець покращують прокалюваність сталі, тому з ростом товщини виробів збільшується і вміст цих елементів. Для забезпечення наскрізної прокалюваності кілець підшипників із товщиною стінки понад 10 мм і роликів з діаметром понад 22 мм застосовують сталь ШХ15СГ замість сталі ШХ15. При товщині стінок кілець понад 30 мм у вітчизняній практиці використовують сталь ШХ20СГ, яка використовується для виготовлення деталей великогабаритних підшипників. Межі розмірів деталей, від яких починається застосування сталі ШХ20СГ або її аналогів, відрізняються в різних країнах. Це пояснюється варіаціями у прокалюваності сталі, зумовленими особливостями технології виплавки, а також різними методами визначення товщини стінок кілець.

З огляду на впровадження сучасних технологій термічної обробки деталей залізничних підшипників обертання, таких як поверхневе загартування при глибинному індукційному нагріві, була розроблена сталь ШХ4 із регламентованою прокалюваністю. За хімічним складом ця сталь відрізняється від ШХ15 зниженим умістом елементів, які впливають на прокалюваність, таких як марганець, кремній і хром. Окрім виготовлення підшипникових деталей, сталь ШХ15 знаходить застосування у виробництві голок розпилювачів форсунок, зворотних клапанів, подушок упорскувальних систем, валиків паливних насосів, роликів, осей важелів та інших деталей, що потребують високої твердості та зносостійкості.

1.2 Хімічний склад шарикопідшипникової сталі

За складом і властивостями шарикопідшипникову сталь можна зарахувати до групи інструментальних сталей. Проте за своїм призначенням вона є конструкційною сталлю спеціального використання.

У таблиці 1.1 наведено хімічний склад деяких марок шарикопідшипникової сталі: хромистої, хромомарганцевокремнієвої та корозійностійкої; для порівняння вказано й марки деяких закордонних виробників.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад окремих 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	-
Японія	SUJ2	0,95...1,1	0,15-0,35	≤0,50	1,3...1,6	0,025	0,025	0,25	0,25	-
Швеція	SKF-24	~1,0	~0,30	~0,30	~1,8	0,025	0,020	-	-	≤0,20
Німеччина	100Cr6	0,90...1,05	≤0,35	≤0,40	1,4...1,65	0,030	0,025	-	-	-
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
хромомарганцевокремниста і хромомарганцева з Mo										
Україна	ШХ15СГ	0,95...1,05	0,40...0,65	0,9-1,2	1,3...1,65	0,027	0,020	0,30	0,25	-
Україна	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	-
Німеччина	100CrMn6	0,9-1,05	≤0,70	≤1,20	1,40...1,65	0,030	0,025	-	-	0,10...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
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
Швеція	SKF-27	~1,0	~0,50	~0,80	~1,95	0,025	0,020	-	-	~0,45
корозійностійка										
Україна	95Х18-Ш	0,9...1,0	0,8	≤0,70	17,0...19,0	0,030	0,025	0,30	0,25	-
Україна	11Х18М-ШД	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
Німеччина	X90CrMoV18	0,85…0,95	≤1,00	≤1,0	17,0…19,0	0,045	0,030	-	-	1,00…1,30
США	440C	0,95...1,2	≤1,00	≤1,0	16,0...18,0	0,030	0,030	-	0,25	≤0,75
Японія	SUS57B	0,95...1,2	≤1,00	≤1,0	16,0...18,0	-	-	-	-	≤0,75
Франція	100CD17	0,95…1,1	≤1,00	≤1,0	16,0…18,0	0,030	0,025	-	-	0,40…0,60

* - не більше

Проблема недостатньої загартованості та теплостійкості виробів із хромистої та хромомарганцевокремнистої сталі в багатьох країнах вирішується шляхом створення їх модифікацій, збагачених невеликими добавками молібдену, ванадію або вольфраму. Наприклад, на німецьких підприємствах виплавляють сталь марки X90CrMoV18, яка містить певну кількість цих елементів.

У ряді країн для економії імпортованого хрому було розроблено кілька модифікацій підшипникової сталі, у яких зменшення вмісту хрому компенсується невеликими добавками молібдену поряд із підвищеним вмістом марганцю.

Високий вміст вуглецю в підшипникових сталях надає їм значної міцності після термічної обробки та чудової стійкості до стирання. Поверхнева твердість таких сталей визначається концентрацією вуглецю в мартенситі, тому цей показник є однаковим для всіх типів шарикопідшипникових сталей.

Твердість внутрішніх шарів матеріалу залежить від глибини загартованості, яка, своєю чергою, визначається вмістом хрому. Оскільки хром уповільнює перетворення аустеніту на перліт, він сприяє збільшенню загартовуваності сталі. Через це для виготовлення деталей підшипників великих розмірів використовують сталь із більш високим вмістом хрому (0,4–1,65%).

Окрім того, тверді хромові карбіди суттєво підвищують зносостійкість сталі. Хром також збільшує стійкість мартенситу до відпустки, зменшує схильність матеріалу до перегрівання та формує дрібнозернисту структуру. Проте при перевищенні вмісту хрому понад 1,65% стає складно досягти однорідної структури, тому у підшипникових сталях цей показник зазвичай не перевищує вказаного значення.

Марганець також сприяє підвищенню твердості та зносостійкості сталі. Однак під час нагрівання він може стимулювати ріст зерна, що призводить до утворення крупнозернистої структури перегрітої сталі після термічної обробки. Кремній, зі свого боку, негативно впливає на в'язкість підшипникової сталі. Попри це, як марганець, так і кремній є ефективними розкислювачами: що більше їхня концентрація, то якісніше сталь знекислюється. Тому бажано обмежувати вміст цих елементів у шарикопідшипникових сталях усіх марок на рівні не більше 0,35% кремнію та 0,4% марганцю.

Сталь типу ШХ15СГ є винятком серед матеріалів для виготовлення великих підшипників, оскільки має підвищений вміст марганцю і кремнію. Це пояснюється їх здатністю знижувати критичну швидкість загартування, що в свою чергу зменшує викривлення і утворення тріщин під час процесу гартування.

Підвищення суми легуючих елементів до 5% і більше виправдано лише за особливих умов експлуатації, таких як корозія чи високі робочі температури. Однак це може значно збільшити витрати на обробку матеріалу та вплинути на довговічність порівняно зі стандартними підшипниковими сталями.

Вміст легуючих елементів по-різному впливає на характеристики підшипників. Наприклад, молібден позитивно впливає на їх довговічність. На сьогодні найкращими за показниками чистоти від шкідливих включень є сталі, виготовлені методами електрошлакового переплаву (ЕШП) та вакуумного дугового переплаву (ВДП). Проте така сталь залишається дорогою, і досі не визначені економічно обґрунтовані норми чистоти металу.

До шкідливих домішок у шарикопідшипниковій сталі належать фосфор, мідь, нікель, кисень, водень, азот, олово, свинець та миш'як. Фосфор сприяє утворенню крупнозернистої структури при нагріванні, що знижує міцність на вигин та підвищує чутливість до динамічних навантажень і схильність до утворення тріщин при загартуванні. Тому його вміст регламентують.

Мідь хоч і покращує твердість та межу міцності сталі, але може викликати утворення поверхневих тріщин при гарячій механічній обробці, що робить її небажаною домішкою. Нікель обмежують через його негативний вплив на твердість матеріалу.

Олово, свинець, миш'як та азот погіршують стійкість сталі до викришування. Водень також негативно впливає на якість через утворення локальних тисків при зниженні температури металу, що може призводити до формування флокенів.

Сірка впливає на властивості шарикопідшипникової сталі неоднозначно. Негативний аспект її впливу полягає в зниженні стійкості до стирання та виникненні втомних руйнувань через вихід сульфідів на робочу поверхню. Водночас, утворення сульфідної оболонки довкола сульфідних включень за умови достатньої концентрації сірки зменшує вплив зазначених включень на концентрацію напруги, що у підсумку забезпечує підвищення опору втоми. Підвищення відношення концентрацій S/O до 3–5 позитивно впливає на довговічність підшипників. Також варто відзначити, що сірка покращує оброблюваність сталі, що додатково сприяє підвищенню якості поверхні.

Деякі дослідники встановили позитивний вплив підвищеної концентрації сірки (до 0,15 %) на довговічність і оброблюваність підшипникової сталі, хоч такі сталі наразі ще не застосовуються.

Окремо слід зауважити роль кисню у формуванні властивостей шарикопідшипникової сталі. Його вплив, як і в інших типах спокійної сталі, пов'язаний із неметалічними включеннями, які він утворює. Неметалічні включення в підшипниковій стали є концентраторами напруги й у певних випадках провокують появу мікротріщин. Останні можуть виникати через підвищену концентрацію мозаїчної напруги або різке охолодження під час загартування. При навантаженні включення здатні руйнуватися і фарбуватися, таким чином формуючи осередки зародження тріщин. Вірогідність руйнування включень визначається їх здатністю до деформації — тому слід уникати утворення крихких включень типу корунду, які не деформуються, і віддавати перевагу пластичнішим часткам, наприклад силікатам. Встановлено, що при рівному рівні кисню шарикопідшипники з кислої мартенівської сталі демонструють удвічі більшу довговічність порівняно з виробами із електросталі, завдяки присутності глобул силікатів замість великих оксидних рядків.

Ймовірність проникнення включень у поверхневий шар залежить від їх кількості, розмірів і форми. Тому важливо мінімізувати загальну кількість неметалічних часток і забезпечити їх найменші розміри. Оскільки рівень утворення включень тісно корелює із концентрацією кисню, його вміст також має бути зведеним до мінімуму. Форма включень повинна бути глобулярною для зниження негативного впливу. Надмірна кількість великих включень спричиняє різке зниження довговічності, аж до стократного погіршення у разі десятикратного збільшення оксидів понад 30 мкм. Чим більшою є твердість та модуль пружності включень, тим вища концентрація напруги у них і тим слабші показники контактної міцності.

У шарикопідшипникових сталях, створених традиційною технологією, вміст таких елементів як кисень становить близько 0,005 %, азоту — 0,01–0,02 %, водню — 0,0001–0,0005 %. Кисень присутній у вигляді оксидів, і його кількість

залежить від технології розкислення. Завдяки вакуумуванню кількість кисню можна знизити до 0,002 %, а за використання ВДП (вакуумно-дугової переплавки) — до 0,001 %.

1.3 Загальні вимоги щодо включень у шарикопідшипниковій сталі

Шарикопідшипникова сталь, яка використовується для виготовлення кульок, роликів і кілець підшипників, повинна мати високу твердість, зносостійкість та достатню пружність, що забезпечує надійну роботу підшипника за умов динамічних навантажень. Важливою є також втомна міцність, необхідна для функціонування в умовах змінних напружень.

Руйнування підшипникових деталей найчастіше спричиняється дією високих навантажень. Тому однорідність металу, яка гарантує стабільність механічних властивостей протягом усього терміну експлуатації, є основною вимогою до підшипникової сталі.

Однорідність металу включає: а) мінімальні відхилення від середнього хімічного складу; б) однорідність макроструктури; в) достатню чистоту щодо неметалевих включень.

У вітчизняному машинобудуванні для виробництва підшипників найбільше поширення отримала високовуглецева сталь, легована хромом, а також сталь із додаванням хрому, кремнію і марганцю.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад шарикопідшипникової сталі, %

Марка сталі	C	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

Сталеві сплави із високим вмістом вуглецю відзначаються хорошою стійкістю до стирання. Додавання хрому, марганцю та кремнію в їх склад покращує

процес гартування, що дозволяє використовувати сталі марок ШХ6 і ШХ9 лише для виробництва невеликих підшипників.

Результати проведених досліджень умов експлуатації підшипників, особливостей термічної обробки та вимог виробництва привели до переходу на випуск шарикопідшипникової сталі єдиної марки — ШХ15 замість трьох існуючих. Наразі цей перехід фіналізується на металургійних підприємствах, що постачають необхідну сталь.

Потреба у мінімальних відхиленнях від стандартного хімічного складу шарикопідшипникової сталі спричинена зв'язком між хімічною та мікроструктурною неоднорідностями, що ускладнюють термічну обробку та наступні етапи виготовлення підшипників. Важливо також забезпечити відсутність дефектів макроструктури металу, зокрема вилучити рихлість — наявність дрібних пор. Такі дефекти проявляються як на прутках сталі, так і на готових виробах. Основним показником якості шарикопідшипникової сталі залишається її чистота від неметалевих включень.

При класичному процесі виплавки сталі в електродугових печах утворюються різні типи неметалевих включень:

1. Сульфідні включення формуються переважно із сульфіду марганцю (FeS-MnS), до яких інколи додається силікатне скло, що утворює витягнуту форму при прокатці металу.

2. Оксидні включення класифікують за двома групами залежно від їх впливу на довговічність підшипників: а) строчечні включення — ланцюжки глинозему (Al_2O_3) або тендітних алюмосилікатів складного складу, які містять компоненти, такі як MnO, CaO, FeO; б) округлі глобули, схожі за складом з силікатами, які через високий вміст кремнезему не деформуються під час обробки.

Оцінка забрудненості шарикопідшипникової сталі проводиться із застосуванням умовних шкал (еталонів). Неметалеві включення негативно впливають на характеристику сталевого сплаву, зокрема підвищення концентрації таких включень з високим вмістом вуглецю спричиняє зниження пластичності матеріалу і збільшує ризик виникнення дефектів. Вплив кількості, розмірів і форми немета-

левих включень регулярно перевіряється на зразках під час контактної витривалості та стендових випробуваннях готових підшипників.

Дослідження показали, що строчечні оксидні включення мають найбільший негативний вплив на довговічність деталей підшипників. У загартованій сталі такі включення створюють зони локалізації напруг — навколо частинок глинозему або алюмосилікатів неправильних форм. Зосереджені напруги можуть бути настільки значними, що призводять до руйнування матеріалу навіть при порівняно невеликому зовнішньому навантаженні.

На рисунку 1.1 представлена залежність величини контактної витривалості (у циклах) від кількості строчечних оксидних включень, які оцінені за баловою шкалою.

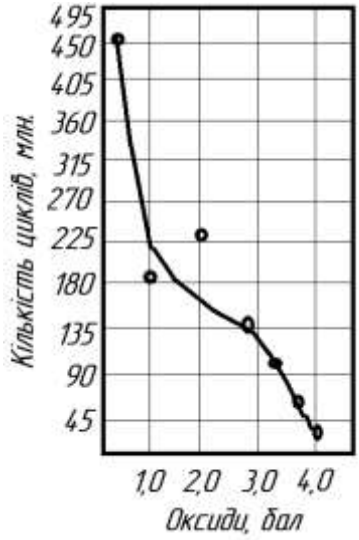


Рисунок 1.1 – Вплив оксидів на контактну витривалість

Непластичні глобулярні включення сприяють «розпушуванню» металу під час прокатки, що призводить до формування мікроскопічних несплошностей у його структурі. Ці дефекти стають центрами руйнування при експлуатації підшипників.

На рисунку 1.2 показано залежність величини контактної витривалості від розмірів глобулярних включень, які вимірюються в мікронах.

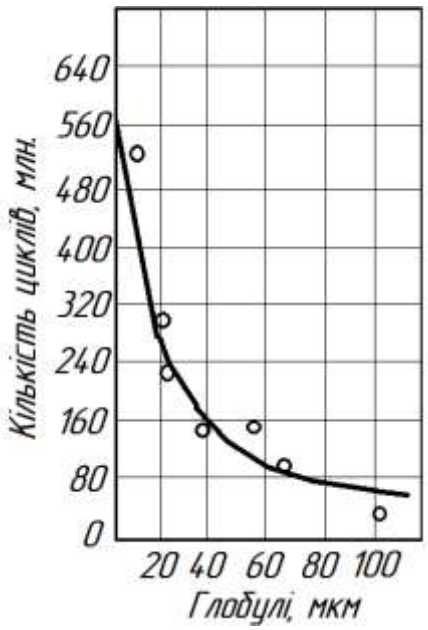


Рисунок 1.2 - Вплив глобулів на контактну витривалість

Зі зростанням чистоти сталі зростає вплив глобулярних включень на довговічність підшипників. Глобулярні включення є небажаними ще й через те, що вони зберігають свої розміри під час деформації. При виготовленні дрібних деталей, таких як кульки, ролики чи кільця, великі глобули (розміром понад 15 мкм) можуть потрапляти на робочі поверхні, що негативно впливає на їх якість.

Сульфідні включення також мають значний вплив на зносостійкість сталі. Вони скорочують експлуатаційний термін підшипників через підвищену стиранність деталей. Під час прокатки сталі сульфіди, завдяки своїй пластичності, витягуються і стають менш небезпечними для утворення значних напружень. Проте, якщо сульфіди виявляються на поверхні деталей, то в процесі роботи підшипників вони викришуються, спричиняючи посилене зношування.

Природа неметалевих включень у шарикопідшипниковій сталі, їх кількість і розміри залежать від технології виплавки та заливання. Тому постійне вдосконалення методів виробництва цієї сталі на металургійних підприємствах спрямоване на підвищення її однорідності, скорочення хімічної та карбідної неоднорідності, збільшення щільності сталі та, найголовніше, на досягнення максимальної чистоти від неметалевих включень.

1.4 Загальні особливості методів виробництва шарикопідшипникової сталі

Шарикопідшипникова сталь, як уже зазначено, поруч із матеріалами для прокатних валків, рейок і залізничних коліс, належить до категорії матеріалів для виробів із контактними поверхнями. Для продукції такого типу дуже важлива відсутність твердих включень у поверхневих та підповерхневих шарах, які не піддаються деформації. При дії тиску на такі включення вони руйнуються, спричиняють виникнення дефектів і стають осередками утворення тріщин, що призводить до поломки виробу. Серед небажаних включень найчастіше зустрічаються Al_2O_3, CaO і MgO. Силікати (оксиди на основі SiO_2) мають суттєво більшу пластичність порівняно з вищевказаними включеннями, що робить їх менш небажаними для цього типу виробів. Саме тому кулькопідшипники зі сталі, виробленої в кислих печах (мартенівських і дугових), виявляються більш довговічними порівняно з підшипниками зі сталі, отриманої в основних печах, що пояснюється зміною складу включень при переході від основного футерування до кислого.

На сьогодні більшість шарикопідшипникової сталі масового виробництва виплавляють у електродугових печах із застосуванням обробки металу в ковшах за допомогою синтетичних вапняно-глиноземистих шлаків.

Ще одним напрямом удосконалення якості підшипникової сталі у вітчизняній промисловості є застосування технологій рафінуючих переплавок, таких як вакуумно-дугова, електрошлакова, плазмова та електронно-променева переплавка. Завдяки рафінуючим переплавкам значно покращується якість сталі — щільність злитка стає вищою, зменшується загальний вміст газів, домішок і неметалічних включень, а розміри останніх у злитку істотно скорочуються.

Важливим напрямом виплавки сталі у відкритих дугових електропечах стало позапічне вакуумування металу в ковші. Це може здійснюватися за допомогою установок циркуляційного або порційного вакуумування, а також технологій вакуум-шлакової обробки.

1.4.1 Виплавка в електродугових печах

Підшипникову сталь виготовляють за двома технологічними схемами: із застосуванням пічного шлаку та з обробкою металу високоглиноземистим синтетичним шлаком у ковші, який отримують у спеціальній печі. Залежно від типу шихти в цих технологіях виплавка може здійснюватися методом переплавки або з використанням свіжої шихти. При переплавці сталі з обробкою пічним шлаком використовують 70–100 % відходів підшипникової сталі. Завершальне розкислення проводять додаванням пічного кускового алюмінію в кількості 0,5 кг/т сталі приблизно за п’ять хвилин до випуску. У випадку виплавки на свіжій шихті з пічним шлаком використовують вуглецевий лом (74–77 %), чавун (18–21 %), а також відходи підшипникової сталі (4,5 %). Остаточне розкислення виконують шляхом добавки первинного алюмінію в обсязі 0,5 кг/т до ковша та додатково 0,5 кг на ковш.

Високоглиноземистий синтетичний шлак може застосовуватись для обробки сталі, виготовленої як зі свіжої шихти, так і методом переплавки. Фізико-хімічні процеси, що відбуваються в ковші при контакті рідкої сталі з рідким вапняно-глиноземистим синтетичним шлаком, полягають у їх активному перемішуванні та емульгуванні при заливанні рідкого металу з достатньо великої висоти. Це приводить до значного збільшення площі контакту між металом і шлаком порівняно зі звичайним способом рафінування сталі безпосередньо в печі.

1.4.2 Спеціальні методи виплавки

Виплавка шляхом змішування в ковші рідких розплавів

Головною особливістю цієї технології є одночасне комплексне застосування трьох металургійних агрегатів: базової мартенівської печі для отримання залізовуглецевого напівпродукту, дугової електропечі для виробництва рідкої лігатури та шлакоплавильної електропечі для створення синтетичного шлаку.

Процес отримання сталі відбувається через змішування залізовуглецевого напівфабрикату з рідкою лігатурою безпосередньо в сталерозливному ковші. Цей процес супроводжується рафінуванням розплаву синтетичним шлаком і продуванням аргоном.

Переваги підвищеної якості та кращих експлуатаційних характеристик сталі, виготовленої за технологією змішування з продуванням аргоном, у порівнянні зі звичайною електросталлю, ґрунтуються на таких теоретичних принципах і підтверджених експериментально фактах:

- поліпшуються умови розкислення та легування сталі в ковші;

- у процесі розкислення бере участь не лише алюміній і кремній, а й вуглець, який формує газоподібні продукти реакції і за обраної технології має значно вищу розкислювальну здатність, ніж кремній;

- забезпечується рівномірний розподіл легуючих елементів по об'єму ковша;

- як об'єкт розкислення використовується залізовуглецевий розплав з відповідним рівнем окисленості, що легко регулюється.

Вакуумна плавка, переплавка та вакуумна дегазація сталі є ключовими методами обробки підшипникової сталі, що забезпечують високий рівень її якості. Існує кілька типів вакуумної обробки для такого типу сталі:

- Виплавка у вакуумних індукційних печах із використанням свіжої шихти.

- Виплавка в електродугових печах із наступною позапічною вакуумною обробкою, що здійснюється в ковші або на спеціальних установках. Цей процес має назву вакуумування чи вакуумна дегазація.

- Переплавка електродів у вакуумних дугових печах, де електродами служать заготовлені прокатані вироби, заздалегідь отримані в електродугових або електрошлакових печах.

Основні особливості вакуумної обробки включають:

- Захист рідкого металу від окислювальної дії атмосферного кисню.

- Зниження розчинності азоту та водню через зменшення тиску в печі, що сприяє їх відділенню й видаленню з металу.

- Зменшення вмісту кисню завдяки підвищенню здатності вуглецю до розкислення. Це дозволяє знизити концентрацію неметалічних включень шляхом їх відновлення вуглецем.

- Зменшення домішок деяких кольорових металів із високою пружністю парів, таких як олово, миш'як, свинець та вісмут.

- Підвищення хімічної однорідності сталі.

Для позапічного вакуумування підшипникової сталі різних марок найчастіше застосовуються такі продуктивні способи:

- Циркуляційний метод (RH), який забезпечує продуктивність однієї установки близько 400 тисяч тонн на рік.

- Порційний метод (DH) із продуктивністю близько 200 тисяч тонн на рік.

- Вакуумування в ковші-печі ASEA-SKF із дуговим підігрівом і електромагнітним перемішуванням металу. Продуктивність таких установок становить близько 200 тисяч тонн на рік.

Усі зазначені установки сумісні з різними сталеплавильними агрегатами, як-от електродугові, мартенівські та конверторні печі. Вакуум забезпечують високопродуктивні параежекторні насоси.

Розливання сталі здійснюється або у зливки, або за допомогою установок безперервного розливання сталі, залежно від вибраного способу обробки.

Електрошлаковий переплав підшипникової сталі став одним із перших успішних прикладів впровадження технології ЕШП. У цьому процесі, проходження електричного струму через шар рідкого шлаку спричиняє виділення тепла, що плавить занурений в шлак електрод. Склад шлаку ретельно підбирають, забезпечуючи високу рафінуючу здатність і значний електроопір. Розплавлений метал, проходячи через шар шлаку, очищується від кисневих включень і сірки. Після цього він потрапляє в водоохолоджуваний кристалізатор, у якому очищений матеріал швидко і рівномірно кристалізується, що мінімізує ризик появи дефектів зливка.

Зливки, отримані за технологією електрошлакової переплавки, вирізняються високою щільністю, відсутністю великих неметалічних включень, рівномірним розподілом дрібних включень, чистотою внутрішньої та поверхневої структури, а також відсутністю усадкових дефектів. Крім того, вони мають високу пластичність під час гарячої механічної обробки.

ЕШП забезпечує ступінь десульфурації на рівні 80 %. Кількість сульфідних і оксидних включень скорочується в 1,5–2 рази, що робить цей процес ефективним з точки зору очищення металу. Однак він залишається досить дорогим, тому сталь, виготовлена таким методом, доцільно застосовувати лише в особливо важливих сферах, наприклад для виробництва підшипників в авіації, атомній енергетиці або інших відповідальних конструкціях.

1.5 Вибір і застосування сучасних прогресивних розробок у технології виплавки сталей для шарикопідшипників

Обумовлюється постійним підвищенням вимог до якості металу. Високі стандарти можуть бути досягнуті лише при виробництві сталі з дуже низьким вмістом домішок, таких як сірка, кисень, водень і неметалічні включення. Однак реалізація цих умов пов’язана зі значними технічними та економічними труднощами. Технологія ASEA-SKF, розроблена шведськими компаніями, є одним із найефективніших способів комплексної рафінованої обробки сталі. Проте цей метод залишається надзвичайно дорогим та трудомістким.

Альтернативний підхід було запропоновано УкрНДІСпецсталлю спільно із заводом "Дніпроспецсталь" та іншими організаціями. Вони розробили метод вакуумування сталі з одночасною обробкою в стовпі синтетичного шлаку (УВСШ), який забезпечує ефективну очищувальну обробку металу за порівняно низької вартості. Суть технології полягає у вакуумуванні сталі під час її потоку через стовп шлаку висотою понад 3 метри. За допомогою різниці між атмосферним тиском і залишковим тиском у вакуумній камері формується шлаковий стовп, обсяг якого залежить від барометричної висоти та перетину.

Процес розпочинається з перенесення металу з сталеплавильного агрегату до передавального ковша, який встановлюється над вакуумною камерою. Потім здійснюється донний випуск з дегазацією в струмені. Розпорошений метал осідає на дно камери, де проходить крізь шлаковий рукав, заповнений синтетичним шлаком, що забезпечує його рафінування. Шлак подається з окремого ковша, розташованого над вакуумною системою. Після завершення обробки очищений метал переходить в приймальний ківш, з якого направляється на подальше розливання у виливниці або на машину безперервного лиття заготівель.

Дослідження показали, що метод вакуумування у поєднанні з обробкою в шлаковому стовпі має значні кінетичні переваги. Очищення від домішок і газів відбувається швидше завдяки особливим процесам дегазації в струмені, де метал рухається краплями чи дрібними потоками по стінках камери. Під час проходження металу через шлаковий стовп утворюється емульсія "шлак-метал", у якій дисперсна фаза – краплі металу – має діаметр частинок у межах 0.05–1 см, а основна маса крапель має розмір 0.3–0.6 см для оптимальної взаємодії зі шлаком.

Площа контакту металу зі шлаком під час обробки у стовпі шлаку перевищує 300 м² на тонну сталі, що значно більше, ніж при використанні синтетичного шлаку в ковші. Цей процес можна визначити як взаємодію фаз у режимі протитечії, де одна з фаз, у даному випадку шлак, практично нерухома. Завдяки цьому ефективність видалення розчинених домішок із металу у стовпі шлаку значно вища, ніж при традиційному способі перемішування фаз, наприклад, при обробці синтетичним шлаком у ковші. Додатково високий рівень рафінування забезпечується тим, що метал після обробки не контактує із забрудненим шлаком, що суттєво ускладнює зворотний перехід домішок зі шлаку в метал.

На виробничій установці заводу "Дніпроспецсталь" проводили обробку підшипникової сталі. Цю сталь виплавляли в печах на 60 тонн шляхом переплавлення відходів із продуванням киснем; шлак під час доведення не розкислювали, а перед випуском металу з печі не видаляли. Проведені експерименти та аналізи показали позитивні результати.

Зважаючи на численні переваги технології порівняно з іншими методами, можна стверджувати, що вона є однією з найсучасніших і перспективних. Її широке впровадження на великих промислових підприємствах України дозволить посилити їхню конкурентоспроможність на світовому рівні, включаючи конкуренцію з провідними металургійними компаніями, такими як ASEA-SKF.

1.6 Загальні відомості про процес вакуумування сталі

Основна мета технологічного процесу полягає у зниженні зовнішнього тиску над металом, що дозволяє змістити рівновагу реакцій рафінування, залежних від чинника тиску.

Покращення якості сталі при вакуумуванні досягається завдяки реалізації наступних процесів:

1. Дегазація металу шляхом зменшення концентрації водню та азоту в його складі.

2. Вакуумне розкислення сталі через підвищення розкислювальної здатності вуглецю. Додатково, зміщення рівноваги реакції окислення вуглецю можна використовувати для глибшого зневуглецювання сталі.

3. Зниження кількості неметалічних включень у металі завдяки перемішуванню та частковому відновленню таких включень за допомогою вуглецю.

4. Часткове видалення небажаних домішок кольорових металів через випаровування легколетучих елементів, таких як цинк, свинець, сурма і олово.

Зважаючи на особливості конструктивних рішень та технологій, виділяють такі способи вакуумування сталі:

1. Вакуумування в ковші.

2. Потокове вакуумування.

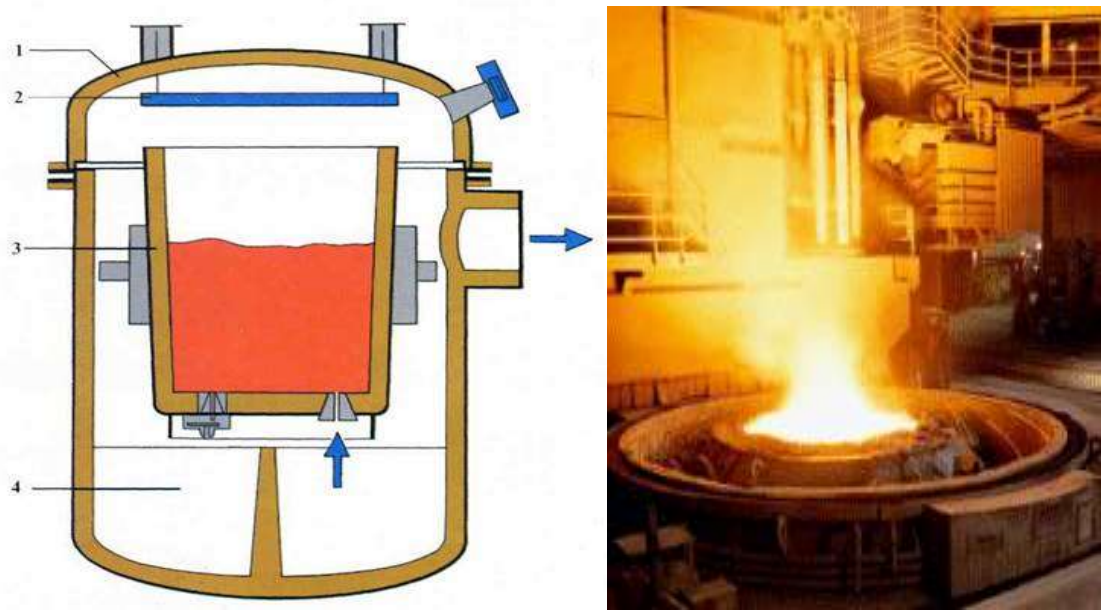
3. Порційне вакуумування.

4. Циркуляційне вакуумування.

Вакуумування в ковші (рис. 1.3) є відносно простим у технічному виконанні та доступним за вартістю способом. Його суть полягає в тому, що сталерозливний

ківш із розплавленим металом встановлюють у вакуумну камеру, де за допомогою вакуумних насосів після герметичного закриття кришки знижують тиск.

Потокове вакуумування може реалізовуватися кількома способами: під час переливання металу з одного ковша в інший, встановлений у вакуумній камері, або при розливанні великих обсягів сталі (понад 50 тонн) у зливки в умовах вакуума, коли у вакуумній камері розміщено виливницю. Зокрема, заслуговує уваги застосування потокового вакуумування під час розливання сталі на машині безперервного лиття заготовок.



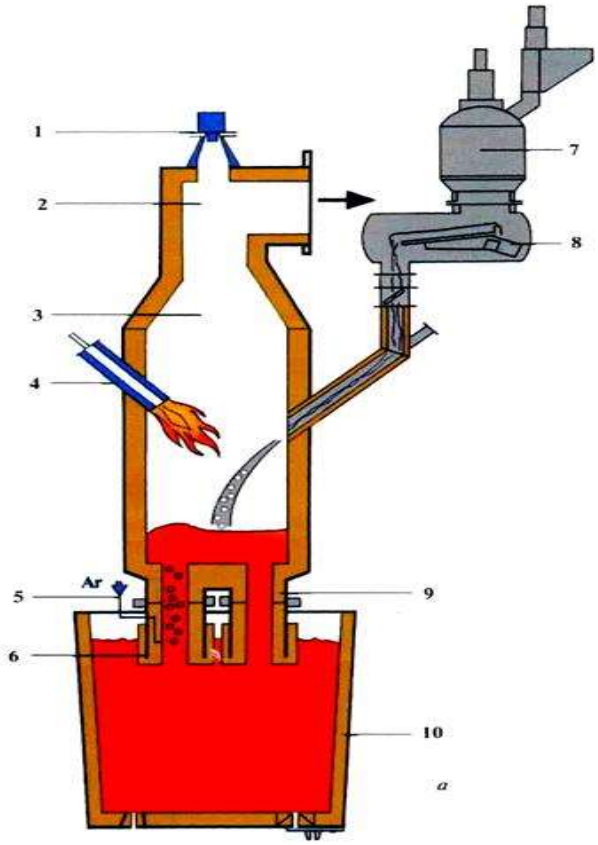
1 – кришка вакуумкамери; 2 - теплозахисний екран;

3 - сталерозливний ківш; 4 - вакуум-камера

Рисунок 1.3 – Установка ковшової вакуумної обробки металу

Порційний і циркуляційний методи вакуумування мають спільну особливість: під час кожного циклу вакуумується лише частина металу, яка засмоктується з ковша в спеціальну вакуумну камеру. Головна різниця між методами полягає у способах обміну металу між ковшом та вакууматором. У порційному вакуумуванні (процес DH) вакуумна камера обладнана одним патрубком, а оновлення порції металу відбувається через вертикальне переміщення вакуумної камери. У випадку з циркуляційним вакуумуванням (процес RH) вакуумна камера має два патрубки: один для введення металу в вакууматор (подаючий патрубок),

а другий для його виведення з камери (відвідний патрубок). Для забезпечення циркуляції металу, після того як патрубки опускаються в ківш, у подаючий патрубок вводиться інертний газ.



1 – цифрова камера; 2 – напрям відкачування повітря з камери; 3 - камера RH; 4 - підігрівання камери; 5 - патрубок для підведення транспортуючого газу; 6 - погружна фурма на вході; 7 - шлюзовий пристрій для введення в камеру легуючих добавок; 8 - лотковий дозатор у вакуум-щільному кожусі; 9 - погружна трубка на виході; 10 - сталерозливний ківш

Рисунок 1.4 - Схема процесу циркуляційного вакуумування

Газовий ліфт, що утворюється, сприяє надходженню нових порцій металу з ковша до вакууматора, а надмірний феростатичний тиск забезпечує повернення відповідної кількості металу через відвідний патрубок назад у ківш.

Отже, на основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що сучасне виробництво шарикопідшипникових сталей потребує впровадження і вдосконалення ефективних технологій. Одним із ключових етапів цих процесів має стати обов’язкове вакуумування металевого розплаву.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Установка, призначена для вакуумування розплавленої сталі у ковші та при розливанні, складається із насосної станції, камери для вакуумування сталі у ковші та приладів для вакуумування сталі під час розливання. Ключовим елементом насосної станції (рис. 2.1) є два насоси типу РВН-60. Кінцевий вакуум для насосів РВН-60 складає близько 15 мм.рт.ст. при заглушеному всмоктувальному патрубку, а при вакуумуванні рідкого металу такий насос може забезпечити тиск нижче 20-25 мм.рт.ст.

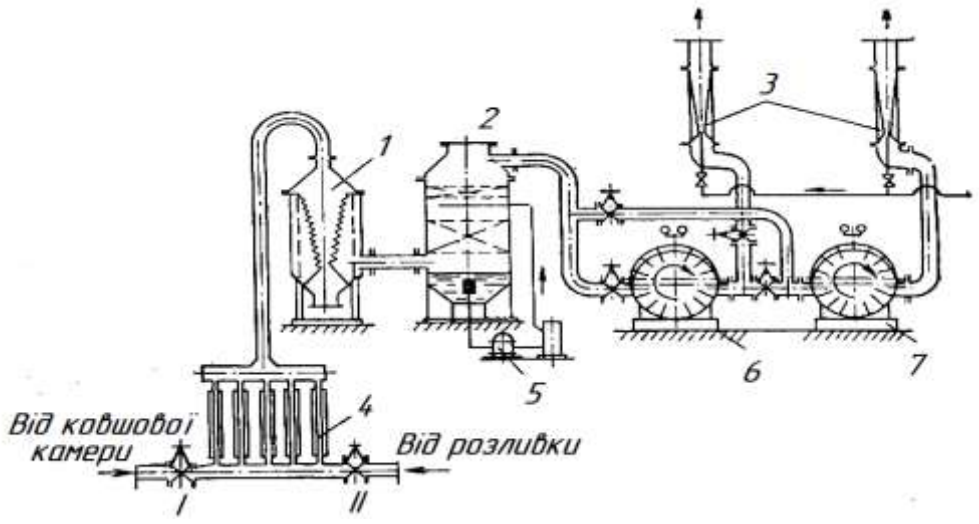


Рисунок 2.1 - Схема насосної станції: 1 - пиловідокремлювачі; 2 - фільтр; 3 - ежектори; 4 - холодильник; 5 - маслонасос; 6 - насос № 1; 7 - насос № 2

У першому періоді експлуатації вакуумної установки вона була оснащена пласким трубчастим охолоджувачем. Пізніше, після того як дослідження підтвердили порівняно невисоку температуру газів, що виходять (50-80 °С), охолоджувач, котрий створював додатковий опір руху газів, було знято.

Насосами РВН-60 не можна відсмоктувати запилені гази, тому у схемі станції передбачено досить ефективне їх очищення. Відсмоктуючі гази проходять спочатку інерційний пиловловлювач, що являє собою вертикальний циліндричний кожух, усередині якого розміщені дві решітки зі смуг нержавіючої сталі. Відсмоктуючі гази опускаються у просторі між ґратами, потім, повернувшись на 160°, проходять між пластинами і йдуть у вакуум-провід. Частинки пилу, що во-

лодіють більшою інерцією, ніж гази, потрапля-ють у нижню частину мішка, де є люк для періодичного очищення. У цьому пило-відокремлювачі осідають головним чином великі частки пилу, шлаку, окалини розміром 0,1-1,0 мм.

Для тонкого очищення газу служить масляний фільтр із примусовою циркуляцією масла.

Гази, що відсмоктували при вакуумуванні, входять у нижній патрубок фільтра і, пройшовши послідовно обидва шари фільтруючих кілець, йдуть через верхній патрубок. Велика площа перетину фільтра (близько 1 м^2) зумовлює малі швидкості руху газів у ньому і, отже, невеликий опір фільтра. Фільтр заповнений (приблизно 100-200 кг) веретенним маслом, має порівняно невелику в'язкість і малу випаровуваність у вакуумі.

Камера для вакуумування сталі в ковші

Камера об'ємом 25 м^3, розташована в розливному прольоті цеху, з'єднаного з насосною станцією вакуумпроводом діаметром 200 мм, що проходить у тунелі нижче рівня підлоги цеху (рис. 2.2).

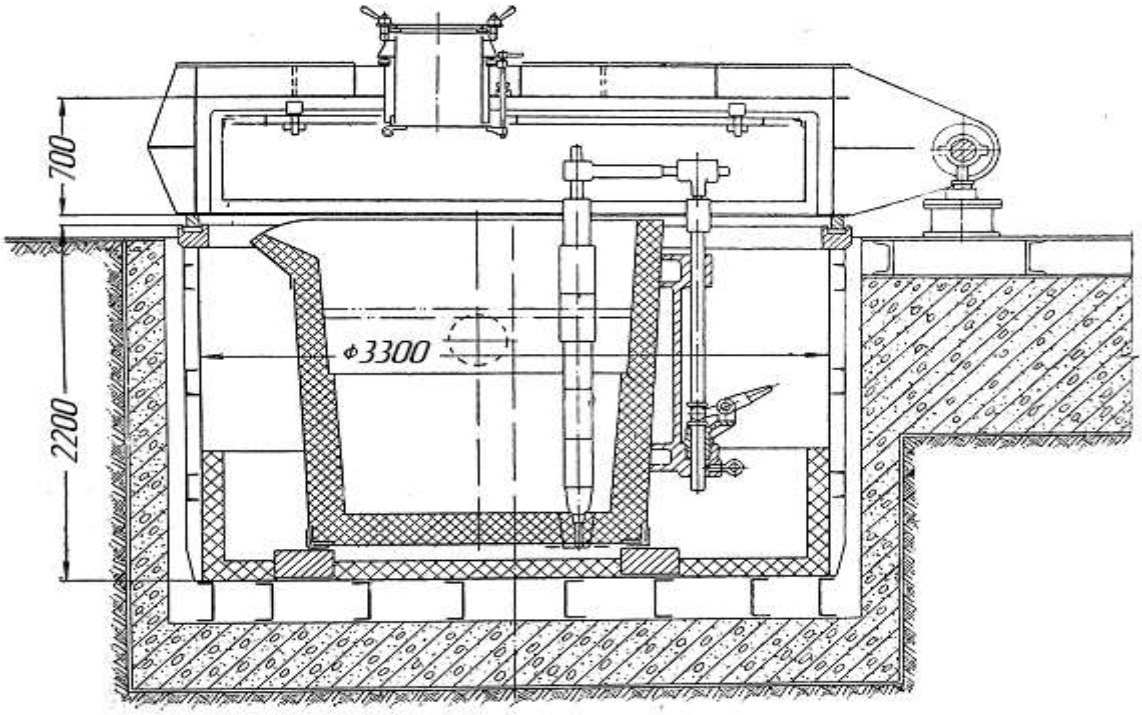


Рисунок 2.2 - Камера для вакуумування сталі в ковші

Корпус апарата є циліндр заввишки 2200 мм та діаметром 3300 мм, зварений із листової сталі товщиною 12 мм. У верхній частині корпус має опорне кільце з пазом для гумової прокладки, на яку при вакуумуванні спирається кільце кришки камери. Днище та стінки корпусу укріплені ребрами жорсткості, внаслідок чого він добре протистоїть зовнішньому атмосферному тиску. Для захисту металоконструкцій апарата від пошкоджень при випадковому потраплянні металу і шлаку днище камери та її стінки на висоту 0,8 м викладені шамотною цеглою.

На цей час кришка апарата сферичної форми виконана зварною з листів товщиною 35 мм. На кришці розташовані оглядовий отвір та бункер для феросплавів об'ємом близько 0,2 $м^3$.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВАКУУМУВАННЯ СТАЛІ ТИПУ ШХ

3.1 Дослідження вакуумування розкисленого металу в ковші

Від початкового моменту, електросталь для шарикопідшипників, виплавлену за усталеною методикою, піддавали обробці вакуумом у ковші. Так, при виготовленні сталі з повним окисленням після повного розплавлення завантаження проводили окислювальний етап, під час якого на шлак додавали руду та вапно для збереження його у активному стані. Кипіння розплаву припиняли, коли вміст вуглецю у ванні сягав не більше 0,85%. Теплота металу перед зняттям окисного шлаку становила 1560-1590 °С.

Після повного введення окислювального шлаку метал легували хромом та марганцем. Потім формували новий шлак за допомогою вапна, плавикового шпату та шамотного бою. У відновлювальний період утворений вапняний шлак розкислювали добавками подрібненого коксу і піч герметично зачиняли на 25 хв., після чого її відчиняли і ванну ретельно перемішували.

У другій половині відновлювального періоду шлак розкислювали добавками подрібненого 75%-ого феросиліцію, час від часу розсипаючи його лопатами по поверхні ванни. Загалом додавали чотири-п'ять порцій феросиліцію, по 15 кг у кожній. Така дія на шлак сприяла видаленню сірки з металу.

Згодом, за 2-5 хв. до зливу, рідку ванну розкислювали алюмінієм, що занурювали у метал на штангах у кількості 500 г/т. Потім ванну перемішували граблями і зливали плавку. При такій технології загальна тривалість відновлювального етапу складала 1,5-2 години.

На експериментальних плавках перераховані головні положення методики залишили незмінними. Змінили лише температурний режим плавок: температура зливу металу була підвищена до 1580-1610 проти 1530-1560 °С для звичайних плавок. Відповідно до цього температуру металу в окислювальному періоді збільшували приблизно на 30°.

Використання наявних 20-т ковшів забезпечило простір над поверхнею шлаку близько 600 мм, що вкрай необхідно при обробці металу вакуумом у ковші.

Після зливу плавки та вимірювання температури, ківш з металом опускали у вакуум-камеру, яка з'єднана із системою станції, де завчасно створювали вакуум (залишковий тиск 1,5-2 мм.рт.ст.). Насоси вмикали за 5-8 хв. до початку вакуумування.

Через отвір великого діаметру у кришці камери проглядалась помітна поверхня шлаку у ковші, при цьому слідкували за станом вогнетривів ковша та стопора.

Спостереженнями було виявлено, що при досягненні тиску 40-50 мм.рт.ст. на скоринці шлаку виникали тріщини, крізь які проривався жар; потім скоринка розколювалася і при досягненні тиску 15-20 мм.рт.ст. розпочиналося кипіння, що супроводжувалося підйомом шлаку (можливо частково і металу) біля стінок ковша на 200-300 мм, після чого інтенсивність кипіння зменшувалась. На деяких плавках кипіння спостерігалося лише біля стінок ковша і у стопора, на інших активне кипіння по всій поверхні ковша тривало до кінця вакуумування. Тривалість обробки металу вакуумом після зниження остаточного тиску 15-20 мм.рт.ст. зазвичай перевищувала 5-6 хв., оскільки за цей час встигали значно зруйнуватися (розмитися) шамотні стопорні трубки.

За час вакуумування теплота металу зменшувалась на 35-60 °С (швидкість охолодження металу 2-3 град/хв), що приблизно удвічі більше, ніж при звичайній витримці такої ваги металу у ковші.

Після вакуумної обробки метал розливали на повітрі сифонним методом у виливниці на злитки вагою 4,1 т.

Результати вакуумування

Проведені раніше дослідження на заводі «Дніпроспецсталь» показали, що вакуумне оброблення в ковші шарикопідшипникової сталі, розплавленої за методикою, схожою до описаної вище, не спричинило зростання чистоти цієї сталі за неметалевими вкрапленнями. Ймовірною причиною цього була недостатня потужність апарату, яка забезпечувала лише залишковий тиск 25-40 мм.рт.ст.

Саме тому у завданні першого етапу нашої праці входило перевірити дієвість вакуумування електросталі, розплавленої за звичайною методикою, але об-

робленої вакуумом при залишковому тиску 5-10 мм.рт.ст. Вивчали вплив глибини вакууму та тривалості вакуумування на ступінь дегазації та розкислення металу, а також на ознаки якості сталі.

Зміну кількості газів (водню, азоту та кисню) у сталі визначали за допомогою олівцевих зразків, відібраних із ковша спеціальними пробовідбірниками до та після вакуумування. Зразки металу одразу загартовували у воді та зберігали у вуглекислоті чи спирті до аналізу. При готуванні зразків до аналізу вживалися заходи проти втрати газів. Зразки аналізували на вміст водню методом вакуум-нагрівання, а на вміст азоту та кисню – методом вакуум-плавлення.

У підсумку аналізів було з'ясовано, що при вакуумуванні шарикопідшипникової сталі, розплавленої за звичайною методикою, вилучається 0,5-1,5 $см^3$ H та 0,5-1,8·10^{-3} % N.

При обробці вакуумом шарикопідшипникової та конструкційної сталі на заводі «Дніпроспецсталь» при залишковому тиску 25-40 мм.рт.ст. кількість водню зменшувалася на 0,3-1,7 $см^3$/100 г.

Помітного зменшення вмісту азоту в сталі не було досягнуто. Між тим, обробка вакуумом киплячої бессемерівської сталі у ковші, незважаючи на досить великий залишковий тиск (70-100 мм.рт.ст.), спричинила зниження кількості азоту на 30-50%.

Закономірної зміни вмісту кисню в металі внаслідок вакуумування не було виявлено: на дев'яти розплавах вміст кисню зріс, і лише на двох розплавах трохи знизився.

Вміст кисню в електросталі, підготовленій дифузійним розкисленням кремнієм та додатковим розкисленням алюмінієм, є дуже малим; значна частина кисню присутня в сталі у вигляді неметалевих вкраплень. Аналіз кисню методом вакуум-плавлення дає змогу визначати «загальний» кисень як розчинений у сталі, так і у формі оксидних неметалевих вкраплень. Тому незрозуміла поведінка кисню в сталі, вірогідно, є результатом зміни кількості неметалевих вкраплень внаслідок вакуумування.

При обробці сталі вакуумом у ковші можливе одночасне протікання двох протилежних процесів: розкислення сталі та часткове відновлення вуглецем найменш стійких оксидних неметалевих вкраплень, і процесу забруднення сталі

вогнетривами ковша і стопора, що руйнуються. Отже, зміна вмісту загального кисню та неметалевих вкраплень у сталі залежить від підсумку цих процесів.

Якість сталі

На початковому етапі вивчення вакуумом у ковші обробили 21 розплав сталі марки ШХ15. Сталь піддали звичному приймаючому контролю за рівнем неметалевих домішок металографічним способом згідно ДСТУ 801-78. Для зіставлення характеристик були перевірені зразки від 62 розплавів сталі ШХ15, зробленої без вакууму у той самий часовий проміжок.

У табл. 3.1 наведено значення середніх балів по оксидних і сульфідних неметалевих включеннях. Аналіз даних середніх значень бала оксидних включень у даній сталі дозволяє зробити висновок, що при вакуумуванні шарикопідшипникової сталі в ковші, виплавленої за звичайною технологією, не відбувається помітного підвищення чистоти сталі по неметалевих включеннях, незважаючи на те, що на більшості плавок залишковий тиск у камері під час вакуумування був 5-10 мм.рт.ст. Звідси випливає, що тільки поглиблення вакууму не може призвести до покращення якості шарикопідшипникової сталі.

Таблиця 3.1 – Зіставлення середніх величин рівня неметалевих домішок у сталі ШХ15

Марка сталі	Сталь	Кількість досліджених зразків	Середній бал включень	
			оксиди	сульфіди
ШХ15	Вакуумована Звичайна	150 320	2,09 2,08	1,46 1,53

Тому, при вакуумуванні в ковші сталі, розкисленої заздалегідь у печі або на випуску сильними розкислювачами (кремній і алюміній) у виробничих умовах, коли досягається невеликий вакуум (5-10 мм.рт.ст.), не може розвиватися процес відновлення оксидних включень розчиненим у сталі вуглецем.

Контролем прокатаних заготовок у темплеті, вирізаних з прибуткової, середньої та донної частин, встановлено, що макроструктура вакуумованого та зви-

чайного металу приблизно однакова. Відзначено дещо меншу пористість (загальну та осьову) вакуумованого металу. Брак по поверхневих дефектах металу на блюмінгу склав для вакуумованої сталі 0,32% проти 1,0% - у звичайних плавках.

Передумови для зміни технології виплавки шарикопідшипникової сталі

Наприкінці окисного періоду електроплавки у ванні міститься збільшена концентрація кисню в розчині. Одним із завдань відновного періоду є зниження до мінімуму вмісту розчиненого кисню.

Використання для цієї мети методу осаджуючого розкислення, при якому у рідку сталь вводять один або кілька елементів, що володіють більшою спорідненістю до кисню, ніж залізо, недоцільно, бо при цьому не можна отримати сталь досить чисту по неметалевих включеннях. Тому при виплавці шарикопідшипникової сталі в електропечах розкислення виробляють дифузійним способом. Розкислюючи шлак, домагаються перерозподілу кисню в системі шлак-метал, і у кінцевому рахунку вміст розчиненого в металі кисню доводять до мінімальних значень.

Неодноразово досліджувалася поведінка кисню у ванні печі у відновлювальному проміжку електроплавлення. По завершенні окисного проміжку вміст кисню у сталі у два-три рази більший за рівноважний з вуглецем і суттєво менший за рівноважний зі шлаком. Це спричинює приплив кисню у метал.

Відновлювальний проміжок розпочинається після завантаження окислювального матеріалу та наведення свіжого вапняного шлаку. На першій стадії відновлювального проміжку знову наведений шлак розкислюють пилом коксу, отримуючи білий або слабокарбідний шлак. Вміст FeO у новому шлаку до кінця першого проміжку розкиснення не перебільшує 1%. За цей період, як це випливає з огляду відомостей табл. 3.2, концентрація розчиненого кисню у металі зменшується на 50-65% та наближається до рівноваги з розчиненим у сталі вуглецем, залишаючись водночас у чотири-шість разів вищою за рівноважну концентрацію з FeO шлаку. Отже, на цьому етапі відновлювального проміжку зберігається розкислювальна дія шлаку.

Таблиця 3.2 – Вміст кисню в сталі ШХ15 в різні періоди плавки

Період плавки	Кількість плавок	Тип розкислювального шлаку	Температура металу, °С	Вміст вуглецю, %	Вміст кисню х 10^{-3}, %			Швидкість окислення вуглецю, % С/год.	Склад шлаку, %*						
					З аналізу	Рівноважний з вуглецем	Рівноважний зі шлаком		FeO	MnO	SiO_2	CaO	CaC_2	MgO	Al_2O_3
Перед видаленням окислювального шлаку	4	Білий	1550	0,80	10,3	2,85 / 4,3	12,5	0,25	8,5	6,3	18,1	29,2	-	12,9	2,9
	6	Карбідний	1580	0,78	10,15	3,1 / 4,65	21,4	0,37	12,8	6,9	16,4	33,5	-	14,1	2,6
В кінці періоду розкислення порошком коксу	4	Білий	1576	0,85	3,8	2,8 / 4,2	0,54	0,067	0,25	0,11	20,0	52,0	1,30	13,6	-
	6	Карбідний	1586	0,92	2,9	2,66 / 4,0	0,54	0,024	0,25	0,13	22,2	50,0	2,50	7,1	-
У кінці періоду розкислення порошком FeSi до додавання алюмінію	4	Білий	1593	1,00	2,8	2,4 / 3,7	0,49	0	0,21	0,08	21,5	47,0	-	8,3	2,0
	6	Карбідний	1598	1,00	1,80	2,45 / 3,7	0,42	0	0,18	0,08	22,7	53,0	0,86	8,25	2,13
Проби після випуску з ковша	4	Білий	1579	-	2,55	0,62 (з Al)	0,6	0	0,27	0,23	26,0	41,5	-	10,3	7,0
	6	Карбідний	1584	-	1,30	0,52 (з Al)	0,98	0	0,44	0,32	27,8	42,0	-	8,0	10,7

Чисельник - рівноважний вміст кисню у верхніх горизонтах ванни, знаменник - у подини.

У другій половині відновлювального проміжку на поверхню шлаку додають пил феросиліцію, внаслідок чого відбувається додаткове розкислення металу не лише на межі шлак-метал, але й на відомій глибині ванни. За 50-60 хв. цього проміжку вміст розчиненого у металі кисню знижується додатково і стає нижчим за рівноважний з розчиненим вуглецем. Однак ця фактична концентрація кисню залишається у чотири-п'ять разів вищою за концентрацію, рівноважну з FeO шлаку.

З наведеного аналізу виходить, що вже при розкисленні шлаку пилом феросиліцію дифузійне розкислення відіграє підлеглу роль. Сталь у цей час розкислюють кремнієм, і процес має переважно осаджувальний характер. З усієї кількості феросиліцію, який додають на шлак для розкислення, витрачається лише половина кремнію, інша його кількість проникає у метал і, реагуючи з розчиненим киснем, засмічує його включеннями кремнезему, які, як відомо, повільно спливають з металу рідкої ванни у шлак.

Перед випуском плавки у ванну вводять 0,04-0,05% від ваги завантаження алюмінію. При температурі 1600 °С рівноважна концентрація розчиненого кисню з 0,05% алюмінію дорівнює $2{,}7 \cdot 10^{-3}$%; отже, додавання у ванну такої кількості алюмінію наприкінці плавки до додаткового розкислення металу не призводить (табл. 3.2). Розкислювальні властивості алюмінію виявляються пізніше при витримці сталі у ковші, при розливанні та під час кристалізації металу, тобто при зниженні температури металу, коли рівновага цієї екзотермічної реакції зміщується у бік повнішого її протікання. Наприклад, вже при температурі 1540 °С рівноважна концентрація кисню з тією ж кількістю алюмінію складає $0{,}62 \cdot 10^{-3}$%. Такий перебіг фізико-хімічного процесу неминуче має сприяти зростанню кількості глиноземистих включень у сталі.

Таким чином, при дифузійному розкисленні шлаку пилом коксу вдається знизити вміст кисню у сталі лише до рівноважної концентрації з розчиненим вуглецем. Подальше зниження вмісту розчиненого кисню, що відбувається при розкисленні шлаку пилом феросиліцію, неминуче веде до забруднення сталі оксидними неметалевими включеннями, а додавання у ванну алюмінію у кількості до

500 г/т сприяє додатковому забрудненню сталі глиноземистими включеннями, що утворюються при охолодженні металу.

При випуску плавки значного розвитку набувають процеси повторного окислення сталі за рахунок кисню повітря, що посилюються зі зростанням концентрацій у металі сильних розкислювачів (алюмінію та кремнію). Надалі у ковші та при розливанні сталі отримують розвиток реакції саморозкислення, що зумовлює збагачення металу неметалевими включеннями.

Отже, класична технологія проведення відновлювального проміжку електроплавлення, що передбачає глибоке розкислення сталі у печі кремнієм та алюмінієм, не може забезпечити високим ступенем чистоти шарикопідшипникової сталі по неметалевих включеннях.

На низці заводів ведуться роботи зі створення більш досконалої технології плавлення шарикопідшипникової сталі; в них більш повно враховується можливість збагачення металу ендогенними неметалевими включеннями поза піччю. Наприклад, дослідами встановлено сприятливий вплив ведення плавки при зниженому температурному режимі. Помірний нагрів металу у печі сприяє повнішому протіканню тут процесів розкислення, і відповідно зменшується їх розвиток у ковші та при розливанні сталі.

Для досягнення гарного перемішування металу зі шлаком велику увагу приділяють випуску металу з печі разом зі шлаком. Окрім форсування десульфурації, такий прийом забезпечує додаткове розкислення металу шлаком, ніж часткове повторне окислення при випуску плавки.

Як випливає з матеріалів міжзаводської школи з виготовлення шарикопідшипникової сталі, на одному заводі ванну розкислюють кремнієм у шматках та алюмінієм на початку відновлювального проміжку, коли у металі ще достатньо кисню для утворення легкоплавких алюмосилікатів заліза та марганцю. За час відновлювального проміжку утворені включення встигають значною мірою піти у шлак і до моменту введення у ванну алюмінію для остаточного розкислення концентрація кисню стає незначною.

На відміну від згаданих вище робіт використання вакууму для обробки сталі у ковші є принципово новим спрямуванням, так як у цьому випадку стає можливим спрямовувати металургійний процес і після випуску плавки з печі.

При традиційних методах розкислення за допомогою алюмінію, кремнію та інших сильних розкислювачів утворені оксиди у металі частково спливають у шлак, а частково залишаються у металі у вигляді неметалічних включень. Тільки один вуглець, діючи як розкислювач, утворює газоподібний оксид CO, що не забруднює метал. Але у звичайних умовах розкислювальна здатність вуглецю невелика, що не дозволяє з його допомогою отримувати сталь з низьким вмістом кисню.

Становище істотно змінюється в умовах вакууму, що випливає з розгляду константи рівноваги реакції розкислення вуглецем:

$$[C]+[O]=CO_{газ}$$

$$K=P_{CO}/(\%[C]\%[O])$$

При сталому тепловому режимі зменшення часткового тиску CO над металом спричиняє зниження добутку [% C]·[% O]. Тому знеокислювальна спроможність вуглецю у вакуумі багатократно зростає, внаслідок чого вуглець, залежно від глибини вакууму, може стати потужнішим розкислювачем, аніж кремній та навіть алюміній.

Поряд із фізичними умовами, потрібними для успішного перебігу процесу знеокислення сталі вуглецем (достатньо глибокий вакуум та незначний феростатичний тиск), необхідно враховувати і стан кисню у сталі. Розглянуті вище умови стосувалися розчиненого кисню у металі або його нестійких оксидів. За наявності у сталі стабільних сполук кисню з іншими елементами — оксидів — вакуумне знеокислення має ускладнюватися. Експериментально в лабораторних умовах з’ясовано, що при вакуумуванні сталі досить повно руйнуються лише оксиди хрому та марганцю; руйнування кремнезему проходить значно слабше, а глинозем при залишковому тиску над металом 1–5 мм.рт.ст. майже не руйнується. Тому для успішного перебігу реакції знеокислення вуглецем потрібно, щоб кисень

у сталі перед вакуумуванням був або у розчиненому стані, або у складі легкоокиснюваних оксидів.

З викладеного випливає, що вакуумна обробка у ковші електросталі, виплавленої за звичною класичною методикою, не може бути результативною, що було доведено дослідженнями першого етапу роботи. Поліпшення властивостей сталі, її чистота по неметалевих включеннях не було досягнуто.

Щоб зробити вакуумування підшипникової сталі більш ефективним, треба було перебудувати методику її витоплення так, щоб перед вакуумуванням метал не містив у розчині сильних розкислювачів, приміром, кремнію та алюмінію. Такий метал при вакуумуванні повинен зазнавати глибокого знеокислення завдяки розчиненому вуглецю та одночасно, внаслідок енергійного кипіння, очищатися від інших газів.

Тому в подальшій роботі була створена нова методика витоплення підшипникової сталі на підставі таких головних засад:

1. До моменту спуску розплаву у розчині металу не повинно бути потужних розкислювачів;

2. Відновний етап проводити без використання феросиліцію та алюмінію;

3. Спущений із печі метал без кремнію та алюмінію піддавати вакуумуванню у ковші, де метал буде інтенсивно знеокислюватися вуглецем;

4. Феросиліцій та алюміній вносити у метал під вакуумом у заключній частині процесу вакуумування для остаточного знеокислення, але головним чином для легування сталі.

Як буде видно з подальшої розповіді, така методика забезпечила зростання якості підшипникової сталі, зменшення балів оксидних та глобулярних включень у ній та значну економію феросплавів.

3.2 Опис і стислий аналіз дослідної методики плавки підшипникової сталі з використанням вакууму

Плавка підшипникової сталі за новою методикою виконувалося методом переплавки та з окисленням у 16-тонних основних електричних дугових печах з трансформаторами 5000 кВА.

При витопленні з окисленням шихту складають так, щоб після розплавлення мати у металі не менше 1,05% С. Залізну руду та вапно додають у ванну під час плавки для введення великої кількості малорухливого шлаку ще до повного розплавлення. Це дозволяє вже у першій пробі металу мати надзвичайно низький вміст фосфору (0,008–0,010%).

Після повного розплавлення шихти шлак частково поновлюють та весь час утримують у дієвому стані, додаючи руду. Окислювальний етап проводять зі збіжними шлаками. Температура ванни наприкінці окисного етапу утримується у межах 1590–1620 °С, це приблизно на 30° вище, ніж на звичайних плавках, що є необхідним для проведення процесу вакуумування металу у ковші. Цією температурою визначається і тепловий режим відновлювального етапу плавки, адже сильне зростання температури у цей період вже небажане через небезпеку порушення нормального шлакового режиму.

Після зливання окисного шлаку ванну, якщо це потрібно, навуглецьовують порошком коксу або електродною крихтою. Потім одночасно додають ферохром (з розрахунку на середній вміст хрому) та шлакову суміш, що складається з вапна, плавикового шпату та невеликої кількості шамотного бою. Загальна маса шлакової суміші складає 4,5% від маси металу, що дещо менше, ніж при роботі за старою методикою. Після додавання шлакової суміші і ущільнення зазорів біля електродів на шлак дають порцію меленого коксу (близько 25 кг) та щільно зачиняють піч.

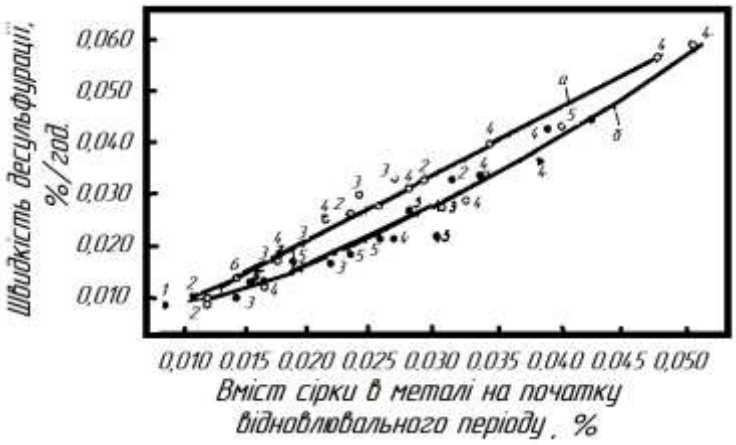
Після 20–25-хвилинної витримки піч відчиняють та відбирають проби металу і шлаку. Встановлено (табл. 3.3), що склад шлаку плавок за новою методикою практично не відрізняється від складу шлаку на звичайних плавках. Отже,

при підвищеному температурному режимі відновлювального етапу можна досягти гарного розкислення шлаку і без застосування порошку феросиліцію.

Таблиця 3.3 – Середній склад шлаків відновлювального етапу (сталь марок ШХ9 та ШХ15)

Технологія виплавки	Кількість плавок	Перша проба шлаку			Друга проба шлаку		
		FeO	CaO	CaC_2	FeO	CaO	CaC_2
Звичайна	148	0,55	55,95	2,13	0,42	57,72	0,65
Нова	141	0,55	55,25	2,08	0,44	57,69	0,65

Головним завданням відновлювального етапу у новій технології є десульфурація металу; тому тривалість етапу визначається початковим вмістом сірки в металі та швидкістю знесірчення. Сподівалися, що темп десульфурації металу при новій технології плавки буде трохи нижчим, ніж при старій, де шлак додатково розкислюють феросиліцієм. Проте аналіз статистичних даних не підтвердив цього передбачення. На рис. 3.1 показана залежність швидкості десульфурації у відновлювальному етапі від початкового вмісту сірки в металі; видно, що при однакових концентраціях сірки точки, відповідні швидкостям десульфурації, на плавках нової технології розміщуються дещо вище, ніж точки для звичайних плавок.



а - вакуумні плавки; б - звичайні плавки

Рисунок 3.1 - Швидкість десульфурації сталі марки ШХ15 в відновлювальний період (цифри у точок - кількість плавок)

Ймовірно, при одній і тій же мірі кислотності шлаку процесу десульфурації металу сприяє піднесена температура відновного періоду і краща плинність шлаку та металу.

При зменшенні вмісту сірки в металі до 0,015-0,018% плавку випускали з печі так, щоб шлак сходив з першими порціями металу. При подальшому сходженні металу відбувається перемішування його з білим шлаком, що, як було встановлено на виробничих плавках, супроводжується додатковою десульфурацією сталі.

Ківш з металом встановлюють у вакуум-камеру і роблять вакуумування. Вакуумна обробка металу, що містить в розчині лише вуглець, хром та марганець, супроводжується інтенсивним кипінням, яке починається вже при залишковому тиску 80-100 мм.рт.ст. Через 5-6 хв. кипіння слабшає, після чого з бункера, наявного на кришці камери, без порушення вакууму вводять у метал кусковий феросиліцій з розрахунку на середній марочний вміст кремнію та алюміній у кількості ~ 160 г/т. Після додавання феросплавів метал закипає вдруге. Кипіння триває 1,5-2 хв. Загальна витримка металу під вакуумом становить 8-10 хв., оскільки необхідно, щоб до зняття вакууму введені елементи встигли рівномірно розподілитися в обсязі рідкого метала.

Таблиця 3.4 - Засвоєння алюмінію на звичайних та дослідних плавках шарикопідшипникової сталі ШХ9 та ШХ15

Технологія виплавки	Номер плавки	Кількість введенного алюмінію	Вміст алюмінію в готовій сталі	Засвоєння алюмінію, %
Нова (введення алюмінію в метал під вакуумом	Т-1861	0,016	0,009	56
	Т-1928	0,016	0,008	50
	Т-1874	0,016	0,010	62
	Т-1644	0,016	0,012	75
	В-1638	0,016	0,006	37
Середнє засвоєння по групі плавок				*56*
Звичайна (введення алюмінію в ванну перед випуском)	В-1485	0,050	0,015	30
	Т-1775	0,050	0,007	14
	Т-1787	0,050	0,020	40
	Т-1795	0,050	0,015	30
	Т-1491	0,050	0,019	38
Середнє засвоєння по групі плавок				30,4

З'ясовано, що введення розкислювачів у метал під вакуумом супроводжується високим відсотком їх засвоєння; кремній із феросиліцію засвоюється в середньому на 90%, тоді як на звичайних плавках порошкоподібний кремній, доданий на шлак, засвоюється лише на 65%, а засвоєння алюмінію становить 56% проти ~ 30% на звичайних плавках (табл. 3.4). Ці відомості підтверджують теоретичні засади про те, що кремній та алюміній, які вводяться в метал після вакуумування, виконують значною мірою роль легуючих домішок, а не розкислювачів.

До завершення вакуумування ківш з металом спрямовували на розливання, яке здійснювалося на повітрі або у захисному середовищі сифонним методом у злитки вагою 4,1 т.

3.3 Дослідження процесу вакуумування рідкого металу в ковші

Дегазацію металу у вакуумі вивчали за зміною кількості газів у зразках металу, відібраних до та після вакуумування, а також за обсягом газів, що відсмоктувалися у процесі вакуумної обробки. Досліджували сталь марок ШХ9 та ШХ15, виплавлену за новою технологією.

Визначення вмісту газів у металі проводилося за зразками, відібраними з ковша за допомогою занурювальних пробниць. Вміст водню визначали методом вакуумного нагрівання зразків із загартованих проб, а вміст азоту у зразках металу – методом відгону.

Результати студій наведені у табл. 3.5 та 3.6.

Як випливає з даних табл. 3.5 та 3.6, зменшення вмісту водню в шарикопідшипниковій сталі, виплавленій за новою технологією, варіюється в межах 32-68%, тоді як при обробці вакуумом у ковші шарикопідшипникової сталі, витопленої за раніше прийнятою технологією, вміст водню знижувався у середньому лише на 18,7%. Вміст розчиненого в металі азоту зменшується в середньому на $3 \cdot 10^{3}$%, що відповідає зниженню його концентрації на 40-45%.

Таблиця 3.5 – Зміна вмісту водню у сталі внаслідок вакуумування

Номер плавки	Марка сталі	Вміст водню $см^3$/100 г сталі		Зниження вмісту водню	
		до вакуумування	після вакуумування	$см^3$/100 г	%
Т-1629	ШХ9	5,40	2,87	2,53	47
Т-1643	ШХ9	6,0	3,09	2,91	48,5
Т-1675	ШХ9	4,73	2,57	2,16	46
Т-1710	ШХ9	2,66	1,46	1,20	45
В-1404	ШХ9	4,55	2,18	2,37	52
В-0936	ШХ9	4,17	1,33	2,84	68
Т-1295	ШХ9	2,36	1,08	1,28	54
Т-1336	ШХ15	3,56	1,64	1,92	54
Т-1366	ШХ15	7,52	3,65	3,87	51
В-1032	ШХ15	8,65	3,70	4,75	57
Т-1644	ШХ15	4,96	2,82	2,14	43
Т-1660	ШХ15	6,57	4,47	2,10	32
В-1348*	ШХ15	5,19	3,81	1,38	27
В-1358	ШХ15	4,41	2,31	2,10	47

* Переплав.

Таблиця 3.6 – Зміна вмісту азоту в результаті вакуумування

Номер плавки	Марка сталі	Вміст азоту, %	
		до вакуумування	після вакуумування
В-0936	ШХ9	0,0042	0,0028
В-0941	ШХ9	0,0119	0,0105
Т-1295	ШХ9	0,0175	0,0098
Т-1284	ШХ9	0,0094	0,0059
Т-1675	ШХ9	0,0099	0,0066
Т-1336	ШХ15	0,0102	0,0021
Т-1341	ШХ15	0,0084	0,0042
Т-1644	ШХ15	0,0138	0,0077
В-1013	ШХ15	0,0066	0,0028
Т-1332	ШХ15	0,0115	0,0063

Обсяг газів, що виділилися, визначали новим способом, названим індикаторним. Сутність його полягає в тому, що у вакуум-провід біля камери вводять із заданою інтенсивністю газ-індикатор, а в газових зразках, що відбираються за вакуум-насосами під час вакуумування, визначають концентрацію цього газу. Аналіз таких проб дозволяє поряд із визначенням складу газів знаходити за концентрацією індикатора кількість кожного складника газової суміші. Як індикатор застосовували природний газ, що містить 96-98% CH_4.

Виявлення початкових концентрацій метану, зроблене на плавках з вакуумуванням металу без введення індикатора, показало, що існує залежність між

вмістом метану CH_4 та сумою $CO+H_2$ у газах, що відсмоктуються. За даними цих плавок була побудована крива, що служить для визначення початкових концентрацій метану (зазвичай не перевищують 0,1-0,3%). На дослідних плавках індикатор починали вводити за 5-6 хв. до початку вакуумування при працюючих насосах. Зразки газів відбирали через кожні 2-3 хв.

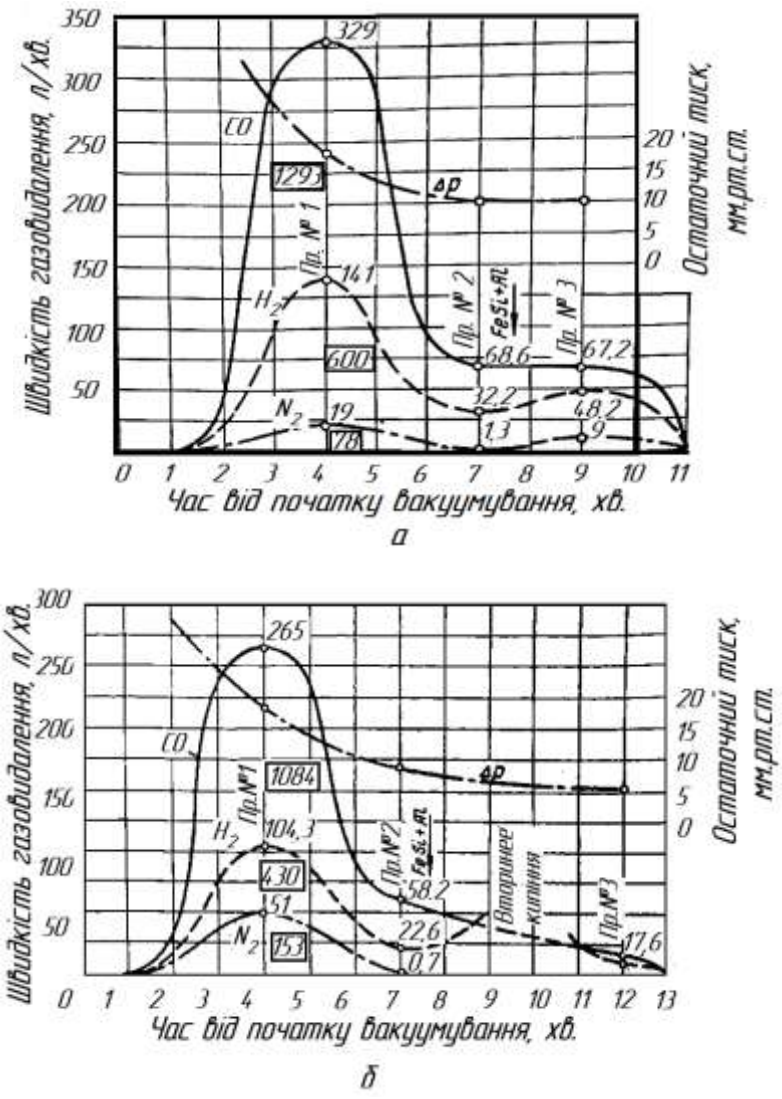
Для розрахунку швидкості газовиділення використовували наступне рівняння:

$$Q \cdot C_1 + q \cdot C_2 = (Q+q) \cdot C_3$$

де Q - шукана кількість газу, л/хв.; q - кількість введеного газу, що містить індикатор, л/хв.; C_1 - вихідна концентрація індикатора в газі, що відсмоктується, %; C_2 - концентрація індикатора газу, що підводиться, %; C_3 - кінцева концентрація індикатора в газі, що відсмоктується, %.

При вивченні графіків газовиділення у плавильних печах (рис. 3.2) кидається у вічі чітко окреслений пік газовиділення, що зазвичай настає через 3-4 хв після старту вакуумування і відповідає етапу бурхливого випаровування шлаку та металу у ковші. Розрахунки, виконані за площами графіків, демонструють, що протягом цього періоду зі сталі вивільняється 60-85% загальної порції газів, які відкачуються. У них домінують CO та CO_2, тобто результати розкислення сталі вуглецем. Спільність піків газів CO', водню та азоту свідчить про тісний взаємозв'язок процесів розкислення і дегазації сталі. Обчислення за площами, окресленими кінетичними лініями та віссю абсцис, вказують, що під час вакуумування виділяється у формі CO' 0,6-0,7·10^{-3}% O.

Після внесення у метал феросиліцію спостерігається короткочасне вторинне бурхливе кипіння шлаку та металу, що супроводжується виходом з металу водню (рис. 3.3). Зі співвідношення випливає, що обсяг водню, який виділився у цей час, суттєво перевищує його концентрацію у феросиліції. Ймовірно, у момент введення у метал твердого феросплаву відбувається додаткове вивільнення газів, чому сприяє виникнення центрів на твердих поверхнях.



а - сталь марки ШХ15; б - сталь марки ШХ9

Рисунок 3.2 – Кінетичні криві газовиділення при вакуумуванні шарикопідшипникової сталі (цифри в рамках - сумарні кількості газів, що виділилися)

Змішування металу в ковші під час вакуумування відбувається надзвичайно жваво під стінами та стопорами ковша, де шорстка поверхня вогнетривів сприяє утворенню бульбашок газової фази. При зростанні об'єму бульбашки відриваються від твердої поверхні та, підіймаючись у металі вгору, захоплюють за собою деякі шари рідкого металу. При сильному кипінні, яке відзначається при вакуумуванні малих обсягів металу, під стінами ковша відбувається істотне підняття металу і шлаку на висоту близько 400 мм.

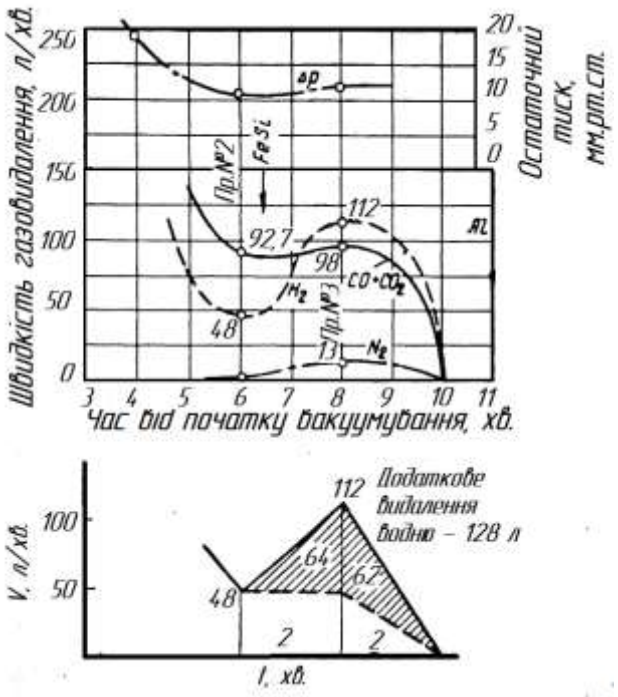


Рисунок 3.3 – Збільшення виділення водню після введення феросиліцію (сталь марки ШХ9)

Цей факт дає змогу гадати, що в процесі вакуумування з'являються інтенсивні циркулюючі течії металу в ковші. Метал підіймається біля футерування ковша та спадає в його центрі.

Як видно за висновками аналізів зразків металу (табл. 3.7), концентрація кремнію в поверхневих і глибинних обсягах металу в ковші майже завжди однакова.

Таблиця 3.7 - Розподіл кремнію, доданого в метал під вакуумом

Номер плавки	Вміст кремнію в металі,%	
	до вакуумування	після вакуумування
Т-1675	Сліди	0,24* 0,24
Т-1624	0,02	0,25 0,23
Т-1629	0,05	0,25 0,25
В-1348	0,03	0,28 0,23
В-1358	Сліди	0,24 0,25
Т-1710	Сліди	0,26 0,26

Взаємодія металу, шлаку та футерування при вакуумуванні. Як зазначалося вище, випуск плавок із печі організовується так, щоб шлак відновлювального періоду стікав у ківш разом із першими порціями металу. За такої умови починають розвиватися рано реакції між високоосновним пічним шлаком і напівкислотними вогнетривами ковша. Однак для плавок, які не піддаються вакуумуванню, інтенсивність взаємодії шлаку та вогнетривів невелика, адже шлак і метал під час витримки та розливання перебувають у відносно спокійному стані.

При вакуумуванні металу в ковші внаслідок кипіння збільшується площа контакту шлаку, металу та футерування. При цьому, природно, підсилюються процеси взаємодії цих трьох фаз, які можуть спричинити механічне руйнування вогнетривів ковша та стопора струменями рідкого металу. Виникаючі при вакуумуванні висхідні потоки металу уздовж стінок ковша розмивають шари розм'якшеного футерування та виносять частки його у шлаковий шар. Крім того, значно збільшується при вакуумуванні внаслідок кипіння поверхня контакту між шлаком і футеровкою, підсилюючи і їх хімічну взаємодію.

Результати аналізів таких шлаків наведено у табл. 3.8.

Помітно, що при вакуумуванні суттєво знижується основність шлаку, помітно зростає вміст у ньому кремнезему та глинозему. Зроблені обчислення щодо зміни концентрації CaO доводять, що маса шлаку внаслідок вакуумування зростає на 10-20%; це у нашому випадку дорівнює розчиненню в шлаку 60-120 кг футерування ковша та стопора.

Трансформація складу шлаку впливає на його десульфуруючу здатність. Як це видно з відомостей табл. 3.8, вміст сірки у шлаку після вакуумування зазвичай зменшується. У певних ситуаціях це зменшення пояснюється зростанням обсягу шлаку, проте відбувається і перехід сірки зі шлаку у метал, що випливає з даних табл. 3.9.

Таблиця 3.8 – Зміна складу шлаку під час випуску і вакуумування (сталь ШХ9 і ШХ15)

Номер плавки	Номер проби	Склад шлаку,%						Основність шлаку	Зниження основності, %	Зміна в концентрації компонентів, %	
		SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	FeO	S			(S)	CaO
В-1032	II III	13,0 12,1	43,9 39,0	29,5 23,2	2,81 5,32	1,30 0,85	0,445 0,405	3,4 3,2	5,9	-9,0	-11,2
Т-1366	II III	12,9 23,6	46,5 38,8	23,4 19,1	3,02 10,18	1,82 0,53	0,668 0,480	3,6 1,6	55,6	-28,2	-16,5
Т-1325	I II II	15,8 16,2 17.2	48,4 42,5 41,4	24,8 30,0 24,2	- - -	1,23 1,30 1,30	0,432 0,490 0,473	3,1 2,6 2,4	16,1 7,7	+11,3 -3,5	-12,2 -2,5
Т-1332	I II III	17,0 17,8 21,0	46,6 45,1 39,9	23,8 25,4 23,2	1,50 2,50 4,70	1,95 1,40 1,38	0,400 0,445 0,400	2,7 2,5 1,9	7,4 24,0	+11,1 - 10,0	-3,2 -11,5
Т-1336	II III	16,4 20,0	44,8 40,8	24,2 21,1	3,18 7,54	1,36 1,30	0,498 0,432	2,7 2,0	26,0	-13,2	-8,9
Т-1564	II III	17,2 22,4	45,6 41,5	27,7 23,4	2,94 7,72	1,14 1,06	0,442 0,420	2,6 1,8	30,8	-4,9	-8,9
Т-1569	II III	17,0 28,8	46,4 37,5	23,0 22,0	3,86 8,22	1,23 0,98	0,270 0,245	2,7 1,3	52,0	-9,2	-19,1
Т-1507	II III	17,1 19,0	44,5 40,5	26,8 23,4	2,60 4,44	0,98 1,47	0,452 0,420	2,6 2,1	19,2	-7,0	-9.0
В-1180	II III	17,4 21,0	42,3 39,3	28,3 23,9	2,62 5,42	1,39 1,45	0,487 0,424	2,4 1,9	20,8	-13,0	-7,0
В-1037	II III	16,8 21,0	49,7 47,3	22,2 19,3	3,60 7,72	1,64 1,14	0,495 0,570	3,0 2,3	23,3	+11,5	-5,0
Т-1501	II III	16,0 26,0	44,2 36,5	29,1 21,2	2,26 6,96	1,31 1, 31	0,427 0,360	2,5 1,4	44,0	-15,6	-17,5

Примітка. I - проба шлаку з печі; II - проба шлаку з ковша до вакуумування; III - проба шлаку з ковша після вакуумування.

Таблиця 3.9 – Вміст сірки в готовій сталі (ШХ9 і ШХ15)

	Технологія виплавки	Кількість плавок	Вміст сірки, %	Підвищення вмісту сірки,%
Плавки з окисленням	Звичайна Нова	157 161	0,009 0,012	33
Переплав	Звичайна Нова	43 61	0,008 0,010	25

В вакуумованій сталі виявився дещо більш високий вміст сірки, ніж в звичайній.

Однак зниження вмісту сірки в шлаку не завжди пов'язане з переходом її в метал. Експериментально встановлено, що частина сірки в процесі вакуумної обробки випаровується з шлаку в газову фазу. Це підтверджується результатами вивчення нальоту, знятого зі стінок вакуум-камери. Хімічним аналізом виявлено в осаді: 0,30% SiO_2; 5,12% CaO; 24,5% MgO; 2,24% MnO; 3,03% FeO; 7,21% Fe_2O_3; 0,02% P_2O_5; 1,52% Al_2O_3; 2,81% S; 2,50% C; 29,8% Na_2O + K_2O; п. п. п. 11,2. Що не увійшли в аналіз компоненти складають сполуки фтору. Таким чи-

ном, вміст сірки в нальоті (2,8%) значно перевищує вміст її в шлаку. Ймовірно, сірка видаляється з шлаку у вигляді з'єднання з фтором SF_6. Інші складові нальоту (підвищений вміст MgO, R_2O і ін.) дозволяють вважати, що при вакуумуванні відбувається виборче випаровування деяких компонентів металу і шлаку. Дійсно, при вакуумуванні можна через оглядовий отвір спостерігати утворення густого туману в камері з самого початку дегазації.

Проблема служби вогнетривких матеріалів ковша. Інтенсивніше розмивання шамотних вогнетривів у зоні шлаку погіршує експлуатаційні умови сталерозливних ковшів, а стрімке руйнування верхніх упорних кілець обмежує тривалість вакуумування. Тому до підбору вогнетривів, стійких під час вакуумування у ковші, приділялася підвищена увага. Використання упорів, зібраних у верхній частині з потовщеними упорними кільцями, дозволило подовжити час вакуумування до 12-14 хв., однак при цьому руйнування кілець сягнуло 30-40%.

Помітно кращі показники були досягнуті при застосуванні високоглиноземистих упорних кілець (Al_2O_3); випробування засвідчили, що знос таких кілець за час вакуумування становив приблизно 2%. Були виконані дослідження вакуумування сталі у ковшах, обладнаних поясом футерування з основних матеріалів. Пояс укладали на рівні шлаку з нізкоосновної магнезитової, магнезитохромітової або високоглиноземистої цегли. На низці експериментальних плавок із ковшів, які мали магнезитові пояси, зразки шлаку відбирали до та після вакуумування. З наведених у табл. 3.10 результатів аналізів виходить, що в цьому випадку взаємодія шлаку та футеровки знизилася, і основність шлаку за період вакуумування змінилася мінімально. Про це ж свідчить і той факт, що після вакуумування зразки шлаку при охолодженні на повітрі розсипалися на порошок.

На поверхні магнезитової цегли (поясу) після завершення розливання формується тонка шлакова настилка, яка сповільнює швидкість охолодження й тим покращує умови його експлуатації. Внаслідок використання основних вогнетривів у поясі термін служби ковшів подовжується до 11-19 плавок замість 4-7.

Таблиця 3.10 - Зміна складу шлаку при вакуумуванні шарикопідшипникової сталі у ковші, оснащеному магнезитовим поясом

Номер плавка	Час відбору проб	Склад шлаку,%					Основність шлаку	Зниження основності, %
		SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S		
Т-0133	До вакуумування	19,6	47,7	20,1	3,9	0,504	2,4	9
	Після вакуумування	21,4	47,3	17,8	5,5	0,528	2,2	
Т-0130	До вакуумування	21,4	48,8	16,8	5,5	0,424	2,3	0
	Після вакуумування	21,1	48,6	17,7	5,5	0,480	2,3	
Т-0427	В печі перед випуском	21,5	56,4	11,2	3,5	0,260	2,6	-
	До вакуумування	21,7	51,9	14,1	4,1	0,400	2,4	8
	Після вакуумування	22,1	49,5	11,1	6,3	0,310	2,4	0
В-0147	В печі перед випуском	20,4	61,2	9,9	5,7	0,470	3,0	-
	До вакуумування	21,3	50,9	12,5	6,3	0,620	2,4	20
	Після вакуумування	21,9	49,4	9,5	9,4	0,530	2,3	4
В-0152	В печі перед випуском	17,4	49,6	10,6	8,5	0,380	2,9	-
	До вакуумування	18,8	46,5	5,5	11,0	0,320	2,5	14
	Після вакуумування	18,9	43,3	18,0	11,1	0,350	2,3	8

Як і очікувалося, перемішування металу і шлаку у процесі кипіння під вакуумом за умови збереження основності шлаку сприяє утриманню й у деяких випадках подальшому переходу сірки з металу у шлак, однак на цей процес негативно впливає високий вміст MgO шлаку як компонента, що збільшує його в'язкість (табл. 3.10).

У зв'язку з виявленим на дослідах впливом основної футеровки (поясу) з'являється додаткова можливість часткової десульфурації металу в ковші одночасно з розкисленням під вакуумом. У ковшах малої місткості перемішування металу з високоосновним шлаком при вакуумуванні дозволяє зростити швидкість десульфурації. Цим прийомом можна зменшити тривалість відновлювального періоду електроплавки, основним завданням якого у новій технології, як зазначено вище, є знесірчування металу.

3.4 Якість вакуумованої шарикопідшипникової сталі

Дієвість нової технології перевіряли насамперед за її впливом на чистоту сталі по неметалевих домішках.

Відповідно до ГОСТ 801-78 вміст неметалевих домішок контролювали на поздовжніх шліфах у каліброваному й гарячекатаному профілі коло 14-24 мм за стандартною шкалою. Прийнятним балом по оксидах і сульфідах є бал 2,0; на одному з п'яти контрольованих зразків припустимий вихід по оксидах і сульфідах до 2,5 балів.

У табл. 3.11-3.13 показано розподіл зразків по балу оксидних, сульфідних і глобулярних домішок, а також середньозважені бали для звичайних і дослідних плавок.

Таблиця 3.11 – Порівняння забрудненості оксидними домішками сталі марок ШХ9 і ШХ15 (профіль діаметром 14-24 мм)

Марка сталі	Технологія виплавки	Кількість досліджених зразків	Розподіл зразків за балами оксидів,%								Середньоарифметичний бал
			1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	Більше 4,0	
ШХ9	Звичайна	3210	1,6	38,5	47,8	6,2	2,4	1,5	1,1	0,9	1,91
	Нова	790	34,7	49,6	12,3	1,3	0,8	0,6	0,17	0,6	1,45
ШХ15	Звичайна	2380	1,3	26,0	52,0	3,0	5,7	3,1	2,7	1,2	2,09
	Нова	110	1,5	61,0	31,0	2,5	1,0	0	3,0	0	1,63

Таблиця 3.12 – Порівняння забрудненості сульфідними включеннями сталі марок ШХ9 і ШХ15 (профіль діаметром 14-24 мм)

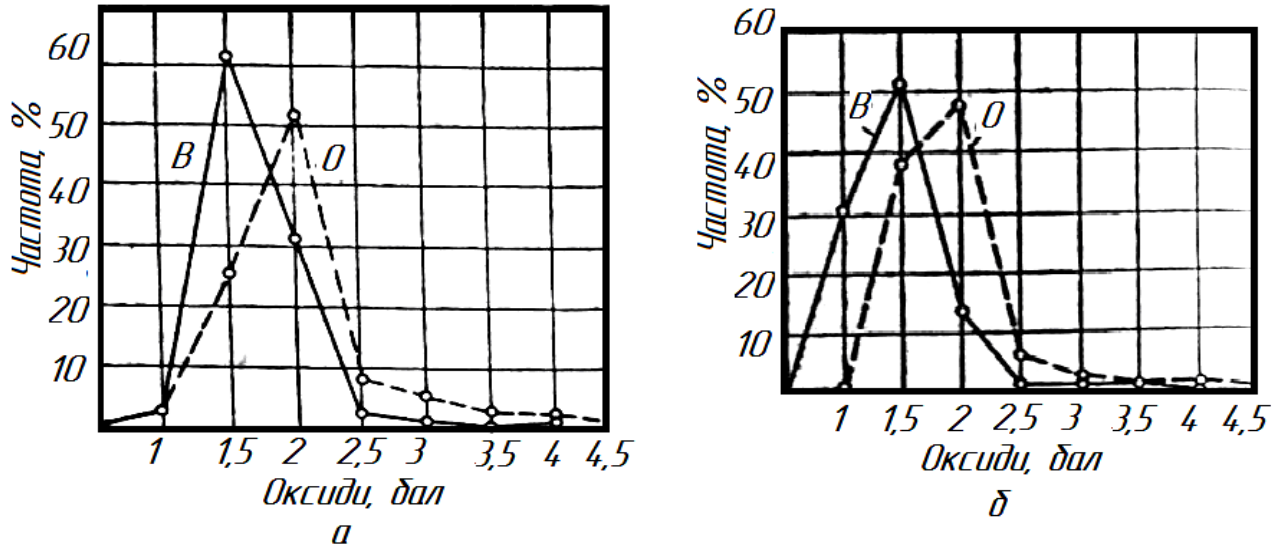
Марка сталі	Технологія виплавки	Кількість досліджених зразків	Розподіл зразків за балами сульфідів, %								Середньоарифметичний бал
			1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	більше 4	
ШХ9	Звичайна	3210	20,9	55,0	22,6	1,25	0,13	0,06	0,06	0	1,52
	Нова	790	33,1	47,0	18,7	1,1	0	0	0	0,1	1,44
ШХ15	Звичайна	2380	13,5	58,0	26,0	1,0	0,75	0,75	0	0	1,62
	Нова	110	6,4	43,6	47,3	2,7	0	0	0	0	1,73

Таблиця 3.13 – Порівняння забрудненості глобулярними включеннями сталі марок ШХ9 і ШХ15 (профіль діаметром 12-24 мм)

Марка сталі	Технологія виплавки	Кількість досліджених зразків	Розподіл зразків за балами глобулів, %								Середньоарифметичний бал
			1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	більше 4,0	
ШХ9	Звичайна	3090	25,9	21,1	31,2	5,33	10,7	1,65	3,55	0,57	1,88
	Нова	780	66,2	15,8	12,9	0,6	3,1	0,1	0,8	0	1,30
ШХ15	Звичайна	2330	17,5	17,3	32,2	7,3	15,9	1,5	6,95	1,35	2,13
	Нова	110	42,7	15,5	32,7	0	7,3	0	0	1,8	1,61

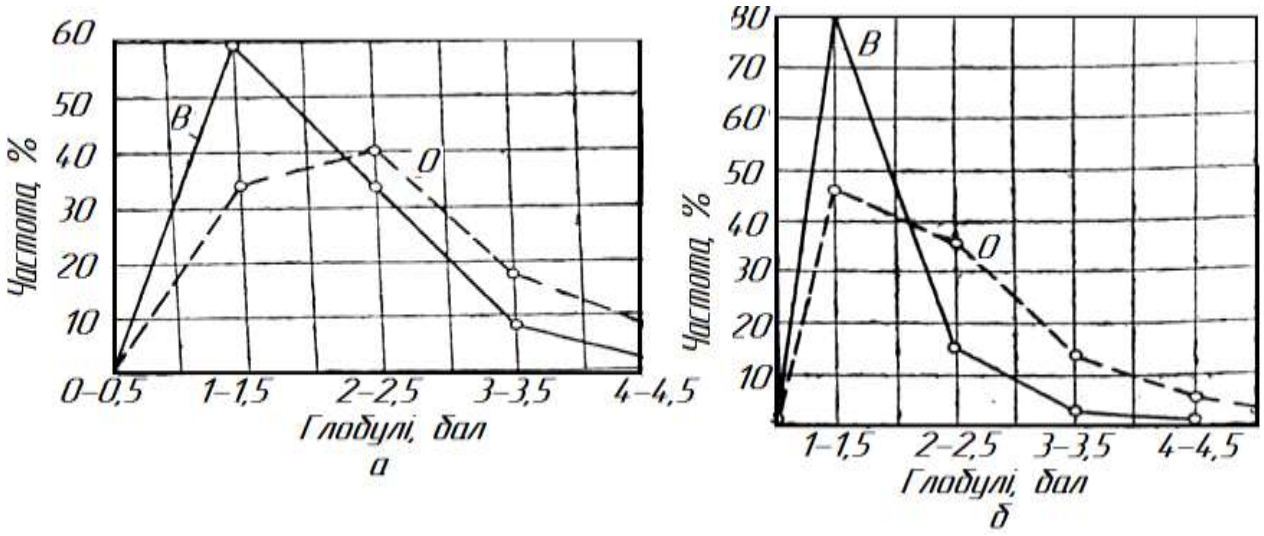
Видно, що ґатунок металу, виплавленого за новою технологією, значно вищий. Наприклад, дослідні плавки ШХ9 мають 84% зразків з оцінкою оксидних включень 1-1,5, тоді як у звичайних плавок ШХ9 таких зразків усього 40%; сталь ШХ15 з оцінкою 1 - 1,5 - 62% проти 27%. Відсоток зразків з вищою оцінкою оксидів (2,5 і більше) в дослідних плавках ШХ9 - 3,5% проти 12,1% у звичайних плавок, ШХ15 відповідно 6,5 та 15,7%. Метал, виготовлений за новою технологією, менше засмічений великими глобулярними включеннями. Наприклад, число зразків з оцінкою глобул 2,5 і більше складає: ШХ9 4,6% проти 21,8% за звичайною технологією: ШХ15 відповідно 9,1 та 33%.

На рис. 3.4 та 3.5 подані частотні графіки, що ілюструють зміну якості. Як помітно, марка, отримана за новою методикою, оцінюється за оксидними та глобулярними домішками приблизно на 0,5 бала нижче, аніж сталь, розплавлена за сталою методикою.



а - сталь марки ШХ15; б - сталь марки ШХ9

Рисунок 3.4 - Порівняння частотних кривих по оксидним включенням (В - вакуумовані плавки, О - звичайні)



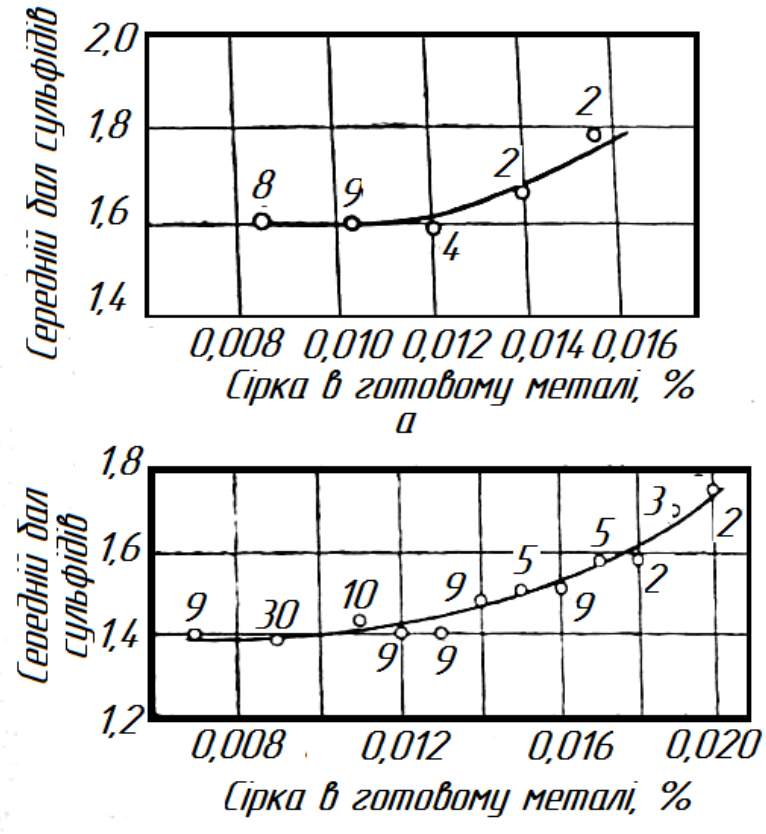
а - сталь марки ШХ15; б - сталь марки ШХ9

Рисунок 3.5 – Порівняння частотних кривих по глобулярним включенням (В - вакуумовані плавки, О - звичайні)

Засміченість сульфідними включеннями зразкових та звичайних розплавів приблизно ідентична. З огляду на те, що у сталі зразкових розплавів дещо більше сірки, аніж у звичайній сталі, варто було б сподіватися на вищий бал сульфідів, оскільки є пряма пропорційність між вмістом сірки у металі та балом сульфідів. Проте виявлена для досліджуваної сталі ШХ9 залежність продемонструвала, що зміна вмісту сірки у сталі в діапазоні 0,008-0,012% практично не позначається на величині балу сульфідів; від концентрації сірки 0,015% згадана вище залежність простежується доволі виразно (рис. 3.6).

Окрім статистичного підрахунку, загальну кількість та будову неметалевих домішок визначали способом електролітичного розчинення частини зразків, вирізаних із прокатаних прутків, котрі відповідали середній частині зливків дослідних та звичних розплавів, з наступним хімічним аналізом виділеного осаду.

Із результатів досліджень для десяти звичних і десяти дослідних розплавів, занесених у табл. 3.14, випливає, що метал звичайної технології містить приблизно удвічі більше домішок, ніж метал дослідних розплавів. Провідним елементом у складі неметалевих домішок є глиноземи. Проте цих домішок у дослідних розплавах міститься вдвічі менше, ніж у звичних розплавах; інші складники домішок змінилися несуттєво.



а - сталь марки ШХ15; б - сталь марки ШХ9

Рисунок 3.6 – Залежність бала сульфідів від вмісту сірки в металі (цифри у точок - кількість плавок)

Таблиця 3.14 – Кількість та будова неметалевих домішок в готовій сталі марок ШХ9 та ШХ15 (у % до ваги металу)

Звичайна технологія виплавки					Нова технологія виплавки				
номер плавки	сума включень	Склад включень			номер плавки	сума включень	Склад включень		
		Al_2O_3	SiO_2	FeO			Al_2O_3	SiO_2	FeO
Т-1466	0,0049	0,0044	0,0004	0,0001	Т-1470	0,0021	0,0017	0,0003	0,0001
В-1136	0,0036	0,0028	0,0007	0,0001	В-0941	0,0016	0,0013	0,0003	-
Т-1482	0,0055	0,0049	0,0004	0,0002	Т-1295	0,0016	0,0014	0,0002	-
В-1130	0,0071	0,0066	0,0004	0,0001	Т-1341	0,0029	0,0025	0,0003	0,0001
Т-1468	0,0070	0,0063	0,0006	0,0001	Т-1507	0,0026	0,0019	0,0005	0,0002
В-1136	0,0038	0,0034	0,0003	0,0001	В-1180	0,0035	0,0029	0,0005	0,0001
В-1192	0,0053	0,0047	0,0003	0,0003	Т-1284	0,0028	0,00023	0,0004	0,0001
Т-1495	0,0064	0,0058	0,0004	0,0002	В-0936	0,0029	0,0020	0,0007	0,0002
В-1111	0,0058	0,0053	0,0003	0,0002	Т-1445	0,0027	0,0023	0,0003	0,0001
Т-1498	0,0058	0,0054	0,0004	—	Т-1501	0,0024	0,0021	0,0002	0,0001
Середнє значення	0,0055	0,0049	0,0005	0,0001	Середнє значення	0,0026	0,0021	0,0004	0,0001

Менша забрудненість досліджуваного металу глиноземистими включеннями добре співвідноситься з особливостями нової технології виплавки, при якій

алюміній вводиться в метал, коли останній добре розкислений вуглецем під вакуумом. При скороченій порції алюмінію, який додається, і високому відсотку його засвоєння неминуче має зменшитися і вміст глиноземистих включень в сталі.

Загальна кількість неметалічних включень визначалася також металографічним способом на поздовжніх шліфах за прийнятою методикою (підрахунок площ, зайнятих включеннями, з наступним перерахунком на вагові відсотки). Результати визначення (табл. 3.15) підтверджують дані хімічного методу оцінки: чистота досліджуваного металу перевершує по неметалевим включенням. Так, сумарний середній вміст оксидних і глобулярних неметалічних включень становить для дослідних плавок 0,00264%, а для звичайних плавок - 0,00410%.

Таблиця 3.15 – Обсяг оксидних і глобулярних включень в зразках готової сталі марок ШХ9 і ШХ15, отриманий металографічним способом

Марка сталі	Номер плавки	Технологія виплавки	Профіль діаметром, мм	Вміст неметалевих включень в вагових відсотках		
				оксидні включення	глобулярні включення	сума
ШХ9	В-1558	Звичайна	16	0,00298	0,00101	0,00399
ШХ9	Т-1833		15	0,00159	0,00060	0,00219
ШХ9	Т-1165		15	0,00250	0,00166	0,00376
ШХ9	Т-1873		16	0,00385	0,00109	0,00494
ШХ9	Т-1161		15	0,00381	0,00121	0,00502
Середнє значення				0,00308	0,00102	0,00410
ШХ9	В-1547	Нова	18	0,00292	0,00174	0,00476
ШХ9	Х-1861		18	0,00108	0,00166	0,00274
ШХ9	Т-1862		18	0,00107	0,00066	0,00173
ШХ9	Т-1841		18	0,00141	0,00139	0,00280
ШХ15	В-1544		18	0,00225	0,00149	0,00374
ШХ15	Т-1643		18	0,00093	0,00070	0,00163
Середнє значення				0,00163	0,00101	0,00264

Аналогічні результати отримані при порівняльному вивченні забруднення металу в 25 полях зору під мікроскопом на кожному зразку. Як випливає з даних табл. 3.16 середній і максимальний бал по оксидним і глобулярним включенням в сталі дослідних плавок значно меншому в звичайній сталі.

Таблиця 3.16 – Забрудненість металу оксидними і глобулярними включеннями, встановлене в 25 полях зору на кожному зразку

Марка сталі	Номер плавки	Технологія виплавки	Оксидні включення			Глобулярні включення		
			середній бал з 125 полів зору	максимальний бал	поперечник включень, мкм	середній бал з 125 полів зору	максимальний бал	поперечник включень, мкм
ШХ9	Т-1482	Звичайна	0,36	4,0	6-14	0,17	2,5	16-42
ШХ15	В-1111	Звичайна	0,18	1,0		0,24	2,0	
ШХ15	Т-1498	Звичайна	0,23	2,5		0,20	1,0	
ШХ9	В-1558	Звичайна	0,23	4,0	12-13	0,69	5,0	48
ШХ9	Т-1778	Звичайна	0,38	4,0		0,44	4,0	
Середнє значення			0,28	3,1		0,35	2,9	
ШХ9	Т-1295	Дослідна	0,12	1,5	5-14	0,09	0,6	7
ШХ9	В-0941	Дослідна	0,13	0,5		0,13	1,5	
ШХ9	Т-1284	Дослідна	0,12	1,0		0,11	1,0	
ШХ9	Т-1846	Дослідна	0,25	1,0	11-14	0,21	1,5	9
ШХ9	Т-1879	Дослідна	0,27	3,0		0,14	1,5	
Середнє значення			0,18	1,4		0,14	1,2	

Металографічним оглядом природи неметалевих включень виявлено, що основним типом є смугасті оксидні включення. У металі з типової технології смуги утворені переважно корундом з невеликою часткою крихкоруйнівних алюмосилікатів; у металі нової технології частка алюмосилікатів відчутно більша.

Кулясті включення в обстежуваному та типовому металі суттєво різняться за розміром; кульки у металі нової технології зазвичай мають у діаметрі не більше 10 мкм, а в металі звичайних розплавів — 16-48 мкм. Кулясті включення у звичайних розплавах складаються з алюмосилікатного скла з домішками корунду, а в обстежуваному металі вони переважно складаються з алюмосилікатного скла та фаяліту ($2FeO \cdot SiO_2$).

Сульфідні включення у металі, виплавленому за тією чи тою технологією, тотожні. Це переважно складні сульфіди типу (Fe, Mn)S.

Макробудова. Зразки, відповідно до верхньої, середньої та нижньої частин обстежуваних злитків, підлягали перевірці макробудови. Ці відомості порівнювалися з наслідками макроконтролю будови злитків звичайних розплавів, виготовлених та прокатаних у той самий проміжок часу. Метал у звичайних розплавах розкислюють з додаванням алюмінію 500 г/т, а за оновленою технологією — 160 г/т.

Таблиця 3.17 – Усереднені відомості макроконтролю обстежуваних та звичайних розплавів ШХ9 і ШХ15

Технологія виплавки	Число плавок	Осьова рихлість		Точкова рихлість, %		
		Бал, %	Бал 1	Бал 0	Бал 1	Бал 2
Звичайна	141	3,2	96,8	0,0	99,3	0,7
Нова	137	13,2	86,8	0,8	99,2	0,0

Як видно з даних табл. 3.17, макробудова злитків та зразкових і звичайних розплавів задовольняє вимогам технічних умов. Повна відсутність осьової рихлості (бал 0) виявлено у 13,2% злитків зразкових розплавів і лише у 3,2% злитків звичайних розплавів. Відзначено також дещо менша ураженість досліджуваного металу волосяними тріщинами. Отже, сталь, виготовлена за новою технологією, розкислена вуглецем та дегазована у вакуумі, має здорову макробудову, незважаючи на зниження домішки алюмінію.

3.5 Вплив окремих чинників процесу вакуумування на забрудненість сталі включеннями

Перебудова відновлювального етапу електроплавки з метою максимального використання розкислювальної здатності вуглецю у вакуумі могла спричинити зміну ступеня впливу окремих технологічних параметрів на забрудненість сталі включеннями.

Для перевірки цього було проведено статистичну обробку даних 643 розплавів нової технології. Вивчався вплив наступних параметрів на бал включень:

а) тривалість відновлювального етапу;

б) температура металу в ковші після випуску;

в) тривалість кипіння металу під вакуумом у ковші до присадки розкислювачів;

г) загальна тривалість вакуумування;

д) величина посадки (висота металу в ковші);

е) глибина розрядження.

Щоб надійно визначити фактор, найбільш ефективно діючий на забрудненість сталі неметалевими включеннями, розплави не поділяли на групи з обмеженими межами коливання фактора у кожній з них, а аналізували всі розплави у цілому.

Вплив тривалості відновлювального етапу

Тривалість етапу в межах 1 год. 20 хв. - 3 год. 00 хв. практично не впливає на забрудненість сталі оксидами.

Таблиця 3.18 – Вплив тривалості відновлювального етапу на забрудненість металу включеннями

Тип включень	Середній бал включень при тривалості відновлювального періоду, годину - хв.						
	До 1-10	1-10 – 1-20	1-20 – 1-30	1-30 – 1-40	1-40 – 1-50	1-50 – 2-00	Понад дві години
Оксиди	1,36	1,34	1,33	1,23	1,32	1,30	1,18
Сульфіди	1,44	1,42	1,46	1,39	1,42	1,42	1,28
Глобулі	1,28	1,22	1,24	1,10	1,29	1,05	1,25

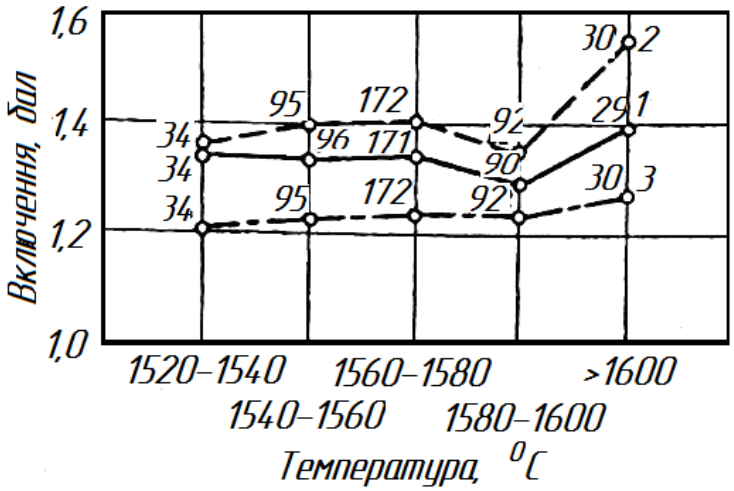
Вплив температури металу в ківші

Температура металу при плавці за старою технологією має певний вплив на вміст оксидів у сталі: з підвищенням температури металу зростає забрудненість його оксидами. Вплив температури сталі в ківші на забрудненість при виплавці за новою технологією подано в табл. 3.19 і на рис. 3.7.

Таблиця 3.19 – Вплив температури металу в ковші на забрудненість його неметалевими включеннями

Тип включень	Середній бал включень при температурі, ^{0}C				
	1520-1540	1540-1560	1560-1580	1580-1600	понад 1600
Оксиди	1,35	1,34	1,35	1,30	1,40
Сульфіди	1,36	1,40	1,41	1,35	1,55
Глобулі	1,21	1,23	1,24	1,24	1,27

Тут також як показник тісноти зв'язку між температурою Т і балом оксидів, сульфідів і глобул визначали коефіцієнт кореляції r. Видно, що в межах 1520-1600 °С, тобто у необхідному температурному інтервалі завершення плавлення сталі, відсутній вплив температури на бал забруднення сталі.



1 - оксидні включення (r=0,073±0,046); 2 - сульфідні включення (r=0,096±0,048); 3 - глобулярні включення (r=0,050±0,048) (цифри у точок - кількість плавок)

Рисунок 3.7 - Вплив температури сталі в ковші на бал включень

Однак оцінка шуканого зв'язку за допомогою критерію достовірності показала, що перегрів понад 1600 °С (у ковші) викликає підвищену забрудненість металу включеннями, ймовірно, внаслідок роз'їдання футеровки стопора та ковша.

У підсумку проведеного дослідження зміни неметалевих включень та кисню у сталі було встановлено, що при плавці за новою технологією, тобто без добавок у ванну кремнію та алюмінію, у сталі до кінця відновлювального періоду міститься дуже мала кількість неметалевих включень (в межах 0,0009-0,0012%). Таким чином, ведення відновлювального періоду в плавці за новою технологією вже саме по собі забезпечує отримання сталі дуже чистої за змістом неметалевих включень. Цією обставиною, ймовірно, пояснюється слабкий вплив розглянутих вище параметрів технології плавки сталі на її забрудненість.

Вплив тривалості кипіння металу під вакуумом у ковші до присадки розкислювачів.

Дані статистичної обробки, здійсненої з метою перевірки впливу цього чинника на утворення оксидних і глобулярних включень, представлені у табл. 3.20. Достовірно підтверджено збільшення забрудненості сталі неметалевими

включеннями, особливо глобулярними, при скороченні тривалості кипіння металу під вакуумом до присадки розкислювачів.

Таблиця 3.20 – Вплив тривалості кипіння металу під вакуумом у ковші до присадки розкислювачів на забрудненість сталі неметалевими включеннями

Тип включень	Бал включень при тривалості кипіння, хв.		Критерій достовірної різниці
	менше чотирьох	більше чотирьох	
Оксиди	1,40±0018	1,30±0,029	2,81
Глобулі	1,39±0,023	1,17±0,022	7,02

Це пов'язано з недостатністю процесу розкислення і дегазації, що в свою чергу призводить до підвищеного чаду розкислювачів, особливо кремнію, і відповідно збільшення вмісту неметалевих включень.

Вплив загальної тривалості вакуумування

Середні величини бала оксидів і глобулів для різної загальної тривалості вакуумування наведені в табл. 3.21.

Таблиця 3.21 – Вплив загальної тривалості вакуумування на забрудненість неметалевими включеннями

Тип включень	Середній бал включень при тривалості вакуумування, хв.			Критерій достовірної різниці
	4-7	8—9	понад 9	
Оксиди	1,37±0,022	1,32±0,009	1,36±0,009	2,14
Глобулі	1,25±0,039	1,18±0,037	1,29+0,029	1,86

Із наведених даних в табл. 3.21 можна зробити висновок, що загальна тривалість вакуумування в зазначених межах 4-9 хв. не впливає на зміну бала включень.

Вплив величини садки (висоти металу в ковші)

Переведення дугових печей на садження з 12 до 16 т спричинило збільшення висоти металу у ковші на 250-300 мм. Для перевірки впливу цього чинника дані плавки згрупували за тоннажем. Наслідки обробки матеріалу подані в табл. 3.22. Як помітно з отриманих відомостей, збільшення висоти металу в ковші веде до погіршення його якості за глобулями. Спостерігається також невелике зростання середнього балу по оксидах.

Таблиця 3.22 – Вплив (розміру садки) висоти металу в ковші на забрудненість сталі неметалевими включеннями

Тип включень	Середній бал включень при вазі плавки, т		Критерій достовірної різниці
	12	16	
Оксиди	1,31±0,010	1,38±0,015	3,79
Сульфіди	1,40±0,009	1,42±0,012	1,32
Глобулі	1,20±0,013	1,39±0,018	8,64

Ймовірно, це спричиняється зростанням чаду розкислювачів, особливо кремнію, при недостатньому рафінуванні глибинних шарів металу.

Негативний вплив феростатичного тиску на повноту процесу рафінування і дегазації побічно підтверджується також на розплавах, коли метал після вакуумування у ковші розливали у виливниці під вакуумом. На цих розплавах відзначалося повторне закипання металу, що супроводжувалося додатковим газовиділенням у кількості 0,10-0,30 нм^3/т, тоді як при вакуумуванні у ковші на цих розплавах виділялося газу 0,21 нм^3/т.

Додатковою дослідною перевіркою (спеціальними засобами для відбору зразків металу на різних рівнях) встановлено нерівномірний вміст домішок по висоті металу у ковші (рис. 3.8, 3.9).

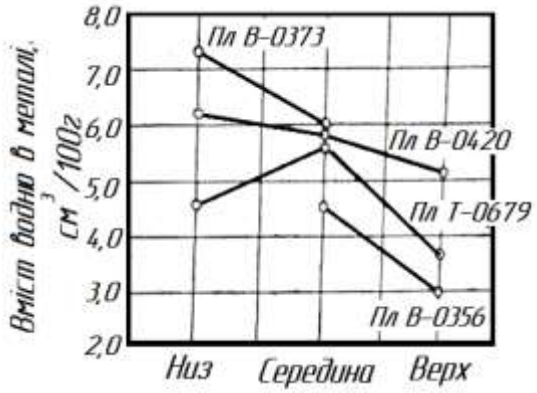


Рисунок 3.8 – Вміст водню в металі на різних горизонтах у ковші після вакуумування

Із цих рисунків випливає, що у поверхневих шарах металу в ковші міститься менше водню й неметалевих домішок, аніж у глибинних шарах. Це доводить, що донні верстви металу беруть слабку участь у «кипінні» під вакуумом і менш позбавляються від водню та неметалевих домішок.

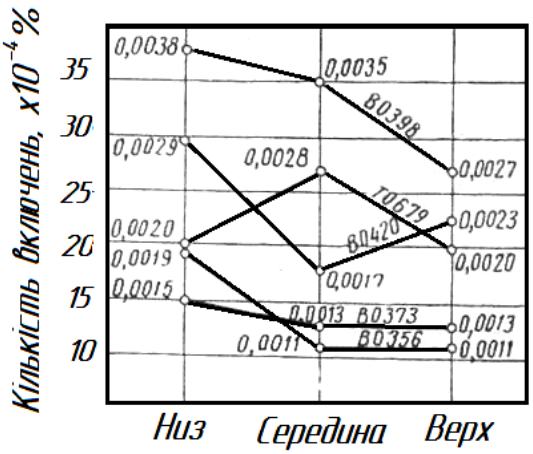


Рисунок 3.9 – Вміст неметалевих включень в металі
на різних горизонтах у ковші після вакуумування

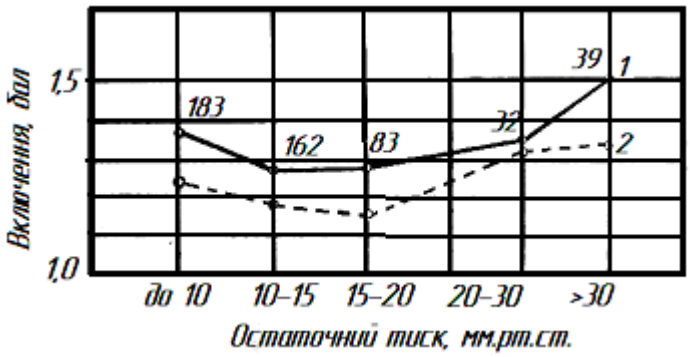
Вплив глибини розрідження

Наслідки контролю якості підшипникової сталі, виплавленої за старою технологією, цілком розкисленої кремнієм та алюмінієм до початку вакуумування, свідчать, що при вакуумуванні в ковші глибина вакууму зовсім не впливає на забрудненість сталі неметалевими домішками, тобто в цьому випадку не стається теоретично можливого збільшення розкислювальної здатності вуглецю при поглибленні вакууму з 25-40 до 6-12 мм і не розпадаються навіть малостійкі домішки в металі.

Стан суттєво змінюється при вакуумуванні металу, не розкисленого сильними розкислювачами, і, отже, того, що утримує значну частку кисню в розчині та нестійких формах. Реакція взаємодії вуглецю з киснем [C] + [O] = {CO} перебігає значно повніше, що уможливлює ефективне кипіння й дегазацію металу.

У цьому випадку шляхом розкислення металу вуглецем вдається знизити забрудненість підшипникової сталі неметалевими домішками.

Статистичною обробкою даних металографічного контролю вакуумованої сталі при різних залишкових тисках встановлено, що вплив глибини вакууму на якісні показники сталі проявляється лише до межі 20-25 мм.рт.ст. (рис. 3.10). Подальше поглиблення вакууму до 5-10 мм.рт.ст. майже не впливає на зміну балансу оксидних і глобулярних домішок.



1 – оксидні включення; 2 – глобулярні включення

Рисунок 3.10 – Вплив глибини вакууму на бал включень

Подальше вивчення впливу цього чинника було проведене шляхом порівняльного металографічного дослідження поздовжніх шліфів зразків із двох груп плавок, виготовлених за один і той самий період, але вакуумованих при низькому (зростання менше 20 мм.рт.ст.) і при високому (зростання більше 40 мм.рт.ст.) залишковому тиску.

Для оцінки сумарної забрудненості сталі використовували показники середнього балу з 25 полів зору кожного шліфа до вагової кількості кожного виду включень, що визначається методом підрахунку. Результати представлені в табл. 3.22, з яких виходить, що оброблена при низьких залишкових тисках сталь містить дрібніші та у меншій кількості оксидні й глобулярні включення. При цьому загальна чисельність включень знижується більш помітно, ніж бал включень.

Таблиця 3.22 – Сумарна забрудненість неметалевими включеннями сталі вакуумованої при низькому та високому залишковому тиску

Оцінка забрудненості сталі	Залишковий тиск, мм рт. ст		Критерій достовірної різниці
	менше 20	більше 40	
Число полів зору	600	600	-
Середній бал з 25 полів зору кожного шліфа:			
оксиди	0,081±0,010	0,133±0,011	3,51
сульфіди	0,194±0,017	0,180±0,014	0,61
глобулі	0,135±0,016	0,200±0,020	2,51
Число шліфів	24	24	-
Кількість неметалевих включень, встановлене металографічним методом,% (вага.):			
оксиди	0,0008±0,00013	0,0017±0,00032	2,61
сульфіди	0,0031±0,00052	0,0035±0,00032	0,66
глобулі	0,00060±0,0000	0,0013±0,00022	3,17

Відносно вмісту сульфідів, вплив глибини вакууму не з'ясовано. Виявлена межа впливу глибини вакууму, ймовірно, зумовлена дією феростатичного тиску металу у ковші.

Справді, деякі металурги вважають, що вакуумування рідкої сталі у ковші не може забезпечити достатньої повноти дегазації через значний феростатичний тиск металу в ковші, і, отже, не дивлячись на простоту цього методу, він не може бути рекомендований для обробки великих обсягів металу в ковшах.

З цієї причини у нас і за кордоном ведуться пошуки умов для якіснішого перемішування металу у ковші при вакуумуванні для посилення дегазації. У практиці низки заводів використовуються методи вакуумної обробки рідкої сталі, що дозволяють суттєво зменшувати вплив феростатичного тиску металу під час дегазації (перелив у вакуумі, циркуляційне та порційне вакуумування і перемішування металу газами при вакуумуванні у ковші.

3.6 Шляхи вдосконалення нової технології

Вдосконалення процесу десульфурації сталі

Як зазначалося вище, при вакуумуванні сталі в ковші, внаслідок посиленої взаємодії футерування зі шлаком і металом, відбувається вивільнення сірки зі шлаку, що є наслідком зниження кислотності шлаку в середньому на 30%.

З відомостей табл. 3.23 видно, що при виробництві сталі за новою технологією збільшилась доля плавок, в яких сірка поверталася зі шлаку в метал протягом випуску та вакуумування. Тому подальші пошуки були спрямовані на удосконалення процесу десульфурації, адже у звичайній технології тривалість відновлювального етапу (і розплаву загалом) визначається часом, потрібним для видалення сірки зі сталі до необхідного рівня згідно з певною маркою сталі.

Таблиця 3.23 – Зміна вмісту сірки в металі за час випуску з печі та вакуумування

Технологія виплавки	Загальна кількість плавок	Зниження вмісту сірки, %	Підвищення вмісту сірки,%
Стара технологія	52	93,0 (48)	7,0 (4)
Нова технологія	85	72,0 (60)	28,0 (23)

Примітка. Цифри в дужках - число плавок

Водночас взаємодія фаз метал-шлак-футерування ковша при відповідній підготовці складу футерування на рівні шлакової фази може бути застосовано для подальшої десульфурації сталі.

Після здобуття обнадійливих результатів провели спеціальний дослід на 58 плавках. Кільця для цих плавок викладали у ковшах на рівні шлаку з магнезитової, магнезитохромітової і високоглиноземистої (Al_2O_3 понад 61%) цегли.

У табл. 3.24 надано відомості про поводження сірки при вакуумуванні у ковшах із різною футеровкою. Видно, що застосування основних кілець у ковшах покращує ступінь десульфурації. Проте, як засвідчили дослідження, використовувати ківш, футерований цілком магнезитохромітовою цеглою, нераціонально через високу теплопровідність останньої, яка спричиняє швидке згущення шлаку та формування великої кількості настилів.

Таблиця 3.24 – Поводження сірки при вакуумуванні у ковшах з різною футеровкою

Футеровка ковша	Число плавок		Усереднена зміна вмісту сірки в металі ΔS, %
	зі збільшенням вмісту сірки	зі зменшенням вмісту сірки	
з магнезитовим поясом	10	28	-0,002
З магнезитохромітовим поясом	1	12	-0,004
З поясом з високоглиноземистої цегли	1	6	-0,002
Звичайна	34	30	-

Крім того, для інтенсифікації процесу десульфурації сталі в окислювальному і в відновному періодах застосовували також метод продувки рідкої ванни порошками (80% CaO + 20% CaF_2) із застосуванням в якості несучого газу азоту або компресорного повітря під тиском 4-5 атм. На рис. 3.11 показано пристосування, використане для вдування десульфуруючої суміші.

Воно являє собою бункер, що герметично закривається, верхня і нижня кришки якого мають гумове ущільнення. Опущені уздовж стінки посудини труби забезпечені по всій довжині отворами таким чином, що газ-носій, який з них виходить, надає суміші порошків обертальний рух. Це здійснено, щоб запобігти

злежуванню порошкоподібної суміші в бункері. Місткість бункера – близько 250 кг порошкоподібного вапна.

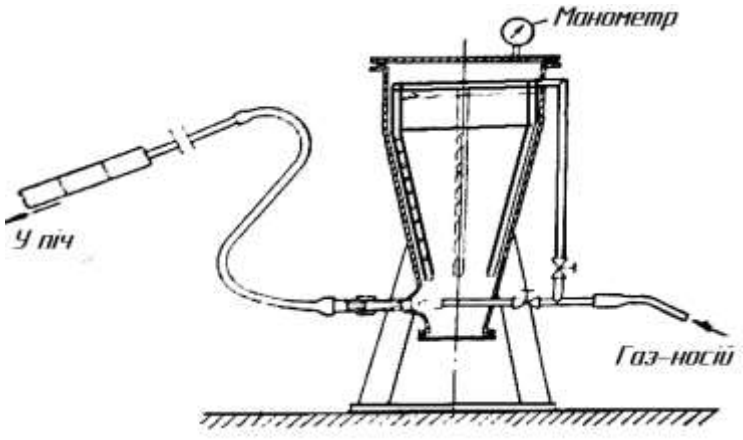


Рисунок 3.11 – Апарат для вдування в рідку ванну десульфуруючих порошків

Дані про результати продувки наведені в табл. 4.24. Видно, що при продувці порошками з використанням звичайного повітря в якості носія, суміш дала незначний ступінь десульфурації. При використанні ж азоту в якості газу-носія, десульфурація досягла 39%.

Таблиця 3.25 – Дані про продування ванни порошкоподібними десульфуратами в 16-т дуговій печі

Номер плавки	Кількість суміші,% до металу	Тривалість продувки, хв.	Температура до продувки, ^{0}C	Аналіз металу,%				Ступінь десульфурації, %	Газ-носій
				до продувки		після продувки			
				S	C	S	C		
В-1219	0,84	4	1530	0,034	0,97	0,033	0,95	3	Повітря
В-1228	1,35	4	1590	0,033	1,03	0,029	1,00	12	Повітря
Т-1832	1,30	5	-	0,026	1,02	0,016	0,99	39	Азот

Складність організації постійної роботи за цим методом змусила обрати шлях обробки металу десульфуруючими сумішами під час випуску його з печі.

У потік сталі під час випуску закидали подрібнений плавиковий шпат і вапно шматками не більше 30 мм у співвідношенні 30 і 70% відповідно. Кількість порошків для обробки не перевищувала 1% від ваги плавки. Ці дослідження були проведені на 20 плавках, з яких 14 випускали в ковші зі звичайною шамотною футеровкою, а метал шести плавок - в ковші, обладнані на рівні шлакового шару

вуглецевою цеглою. В процесі експлуатації таких ковшів було встановлено, що вуглецева цегла добре протистоїть агресивному впливу високоосновного шлаку і не формує настилів. Проте внаслідок контакту металу з вуглецевим кільцем відбувалося науглецювання сталі на 0,01-0,03%.

У табл. 3.26 представлено поводження сірки на плавках з обробкою потоку металу порошками, а на рис. 3.12 і табл. 3.27 наведені середні дані через трансформаційні зміни вмісту компонентів у шлаку і сірки в металі при випуску і вакуумуванні для всіх варіантів футерування ковша і при обробці потоку металу десульфуруючими порошками.

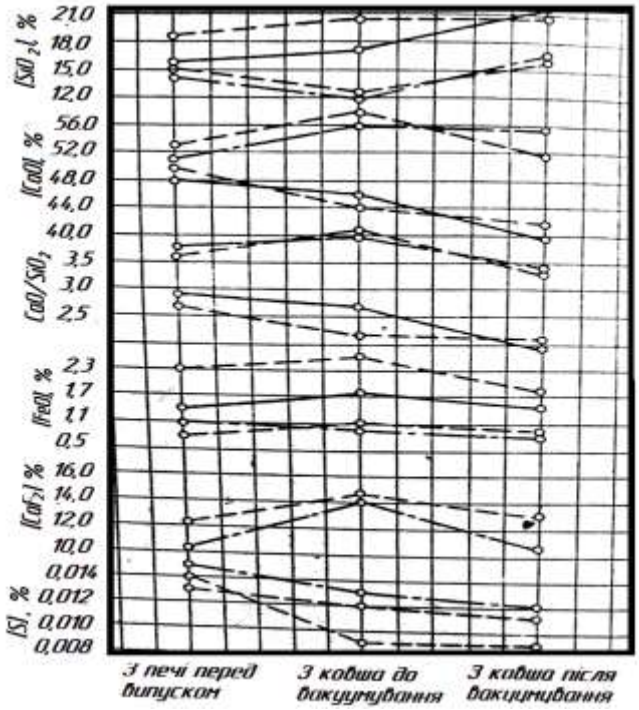
Таблиця 3.26 – Залежність ступеня десульфурації металу від способу його обробки і футерування ковша

Варіант технології	Число плавок	Кількість видаленої сірки за період випуску та вакуумування, %	Середній вміст сірки в готовій сталі, %	Число плавок з відновлення сірки
Плавки з обробкою сумішами під час випуску	14	0,003	0,011	1
Звичайні вакуумовані плавки	87	0,001	0,014	24
Плавки з обробкою сумішами (ковші з вуглецевими кільцями)	6	0,005	0,009	0
Звичайні вакуумовані плавки	75	0,003	0,011	8

Таблиця 3.27 – Зміна складу шлаку в ковші з різною футеровкою і при застосуванні десульфураторів

Футеровка ковша	Число плавок	Час відбору проб	Склад шлаку,%			Основність
			SiO_2	CaO	FeO	
Звичайна	14	1 2 3	15,80 16,63 22,10	47,50 46,60 39,73	1,13 1,48 1,14	2,92 2,74 1,88
З основним поясом	8	1 2 3	18,80 20,05 20,70	50,60 44,58 41,45	2,10 2,26 1,56	2,70 2,20 2,00
Звичайна (на струю металу давали десульфуратор)	9	1 2 3	14,13 12,71 16,24	51,05 54,56 54,46	0,74 0,64 0,54	3,86 4,05 3,35
З вуглецевим поясом (на струмінь металу давали десульфуранти)	6	1 2 3	15,12 12,90 15,94	53,51 57,53 51,14	0,58 0,74 0,64	3,67 4,32 3,27

Примітка. 1 - проба з печі перед випуском; 2-проба з ковша до вакуумування; 3-проба з ковша після вакуумування.



———— - плавки, виплавлені за звичайною технологією;

-------- - плавки, випущені в ківш з основним поясом (плавки за звичайною технологією);

— — — — - плавки з обробкою струменя металу при випуску десульфуруючою сумішшю;

— · — · — - те ж, але з випуском в ківш з поясом з вуглецевих вогнетривів

Рисунок 3.12 – Зміна складу шлаку і сірки в металі при різних варіантах обробки і футерування ковша

З одержаних відомостей випливає, що:

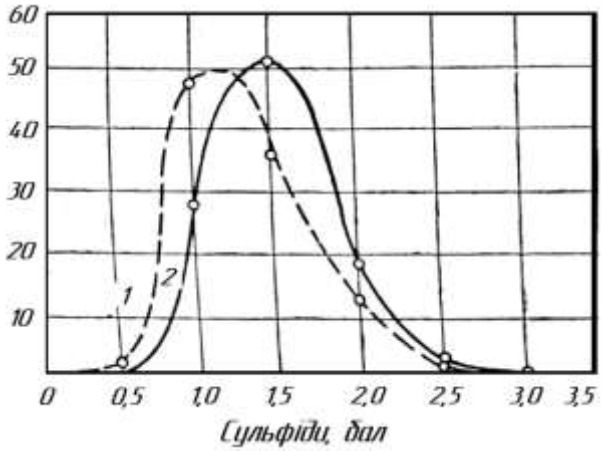
1. На звичайних розплавах основність шлаку за час виливу до вакуумування зменшується. На розплавах з обробкою струменя металу десульфуруючими сумішами основність шлаку зростає.

2. За час вакуумування основність шлаку на звичайних розплавах ще більше спадає, а на розплавах з обробкою металу десульфуруючими сумішами основність шлаку хоча й знижується, проте лишається доволі високою.

3. На розплавах із випуском металу у ковші, забезпечені основними кільцями, основність шлаку зменшується несуттєво.

4. На розплавах, де метал оброблявся порошками, створювалися кращі умови для десульфурації, ніж на звичайних розплавах.

На рис. 3.13 показані дані металографічного контролю розплавів, провакуумованих у ковшах з кільцями з основних та глиноземистих матеріалів. Видно, що при застосуванні таких ковшів, внаслідок покращення процесу десульфурації сталі, досягається зменшення балу сульфідних включень.



1 – плавки в ковшах з поясом з високовогнетривких матеріалів;

2 – плавки в ковшах зі звичайною футеровкою

Рисунок 3.13 – Розподіл сульфідів в сталі, що вакуумована в ковшах з різною футеровкою

1. На підставі даних проведених дослідів слід вважати слушним при вакуумуванні сталі ковшовим методом послуговуватися для футерування високовогнетривкою цеглою на рівні шлакового шару; Перед встановленням такого ковша під жолоб треба ретельно видувати настили, що осипаються.

2. На розплавах, проведених з порушенням шлакового режиму та при ненормальному перебігу процесу десульфурації металу в печі, раціонально використовувати десульфуруючі суміші для обробки сталі під час випуску з печі.

Покращення розподілу розкислювачів, що додаються в ківш під вакуумом

Унаслідок охолодження шлаку після випуску плавки у ківш та подальшого вакуумування сталі в'язкість шлаку зростає, що спричиняє труднощі при розкис-

ненні його 75%-вим феросиліцієм у ковші під вакуумом. У низці випадків з цієї причини траплялося заплутування феросиліцію в шлаку та невідповідність щодо кремнію в аналізі. Так, із 754 плавок, які піддавали контролю, на 23 вміст кремнію не відповідав заданому. Зразки для контролю добували в ковші на глибині 300 та 1200 мм від дзеркала металу.

Задля покращення однорідності розподілу кремнію в обсязі металу ухвалили рішення перейти до застосування 45%-вого феросиліцію замість 75%-вого, оскільки густина першого значно більша. Порівняли наслідки 30 спеціально виконаних плавок та встановили, що така заміна слушна (рис. 3.14).

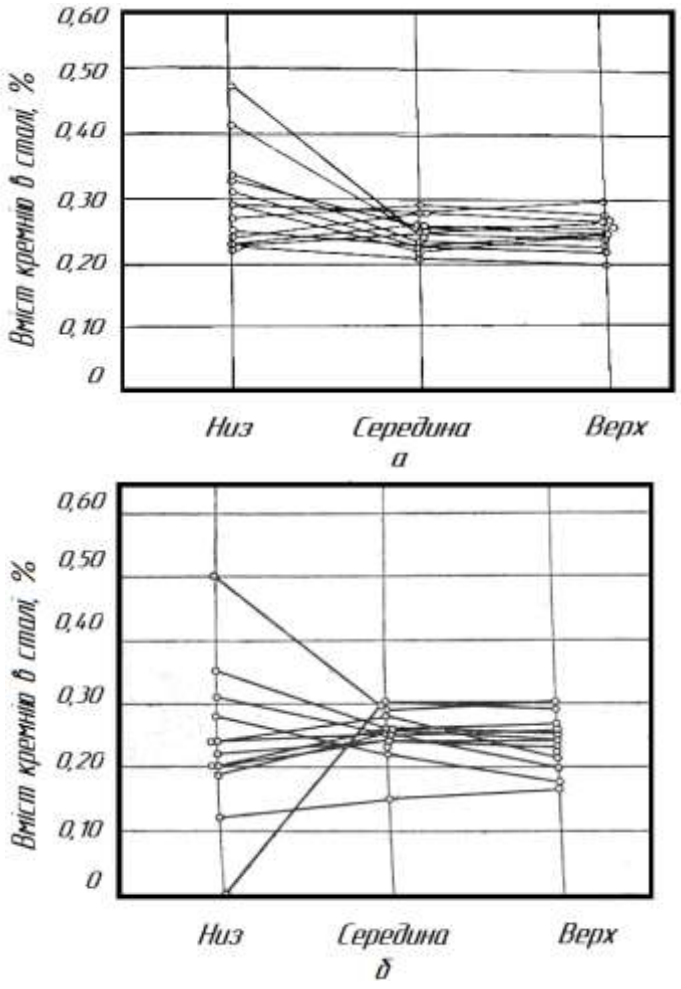
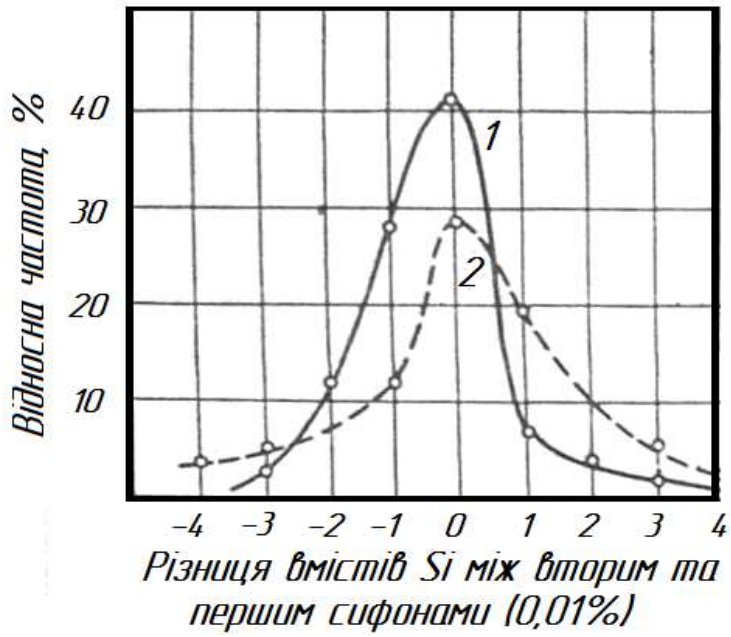


Рисунок 3.14 – Розподіл кремнію в металі в ковші
при його розкисленні 45%-вим (а) і 75%-вим (б) феросиліцієм

На рис. 3.15 і в табл. 3.28 наведені підсумки контролю 120 плавок із розкисленням металу 45%-вим феросиліцієм:

а. При розкисненні 45%-вим феросиліцієм кремній поширюється рівномірніше, аніж при розкисненні 75%-вим; коефіцієнт варіації (коливання) на плавках, де застосовувався 45%-вий феросиліцій, складає 23,3%; проти 36,1% для плавок із розкисленням металу 75%-вим феросиліцієм.

б. Дещо знизився показник глобулярних включень у металі, розкисленому 45%-вим феросиліцієм, що, вірогідно, зумовлене меншим вигоранням кремнію. Показник оксидів трохи зріс, що обґрунтовується збільшеною часткою алюмінію, який потрапляє в метал із 45%-вого феросиліцію.



1 - 45%-вим феросиліцієм (V = 23,3 ± 1,0%);

2 - 75%-вим феросиліцієм (V = 36,1 ± 2,9%)

Рисунок 3.15 – Частотний графік розподілу кремнію в об’ємі металу при його розкисленні

Таблиця 3.28 – Забрудненість шарикопідшипникової сталі при використанні різних розкислювачів

Тип включення	Середній бал включень при застосуванні		Критерій достовірної різниці
	75% FeSi	45% FeSi	
Оксиди	1,29±0,033	1,401±0,033	12,81
Сульфіди	1,351±0,034	1,421±0,034	1,62
Глобулі	1,241±0,040	0,98±0,034	4,95

В табл. 3.29 також порівнюються результати контролю сталі ШХ15, виплавленої за новою технологією з даними контролю якості тієї ж сталі, виплавленої за старою технологією, але отриманої в злитках і прокатаної на той же профіль 16-22 мм.

Таблиця 3.29 – Забрудненість шарикопідшипникової сталі ШХ15, виплавленої за новою технологією і за старою технологією, прокатаної на коло 16-22 мм

Технологія	Число плавок	Число зразків	Бал неметалічних включень		
			оксиди	сульфиди	глобулі
Нова технологія	22 391	110 1955	1,63 1,43	1,73 1,59	1,61 1,22
Стара технологія	215	1075	1,71	1,60	2,05

Видно, що внаслідок вдосконалення нової технології плавлення сталі досягнуто помітне піднесення чистоти сталі по неметалевих домішках, особливо глобулярних.

Наостанок необхідно зазначити, що останнім часом запропонований нами принцип вакуумування неокисленого металу знаходить широке впровадження в металургійній практиці. Завдяки переходу на такий метод вакуумування досягається більший вплив дегазації сталі та зниження вмісту в ній неметалевих домішок.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

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

Сталеплавильна лабораторія розташована в межах електросталеплавильного цеху, а тому інженер-дослідник зазнає впливу небезпечних і шкідливих факторів, притаманних робочим умовам цеху. Електросталеплавильне виробництво належить до категорії підвищеної небезпеки. У ході плавки та розливання сталі працівники працюють із рідким металом і шлаком, і перебувають у середовищі високих температур. Дослідження металургійних процесів поблизу джерел тепла спричиняє перегрівання організму.

Під час підготовки матеріалів і печі до плавки, заливання чавуну, випуску та розливання сталі відбувається виділення значної кількості пилу, променистої енергії, оксидів азоту та сірки, а також інших шкідливих речовин у робочу зону. Насичення цеху електромостовими кранами, завалочними машинами й іншим електричним та механічним устаткуванням створює ризик механічних травм та ураження електричним струмом. Значну небезпеку становлять обертові деталі та рухомі механізми. Продукти плавки, такі як сталь та шлак, що зливаються з печей, є вибухо- та пожежонебезпечними, сприяють загазованості та підвищенню теплового навантаження.

Відповідно до класифікації, основними небезпечними та шкідливими факторами є:

- рухомі машини і механізми;
- рухливі деталі виробничого обладнання;
- загазованість робочої зони під час продувки металу аргоном у ковшах;
- запиленість робочої зони в місцях перевантаження сипучих матеріалів.

Серед поширених ризиків також виділяються виплески та викиди рідкого металу з ковша під час його транспортування або проміжного переміщення, про-

риви металу з ковша. Такі випадки можуть призвести до опіків різного ступеня, аж до повного згоряння працівника.

Вплив пилу на організм залежить від його хімічного складу і походження. Нетоксичний пил викликає подразнення шкіри, очей і вух. Дисперсність пилу суттєво впливає на її властивості: чим менша частинка пилу, тим легше вона проникає в організм. Частинки розміром від 0,01 до 10 мкм можуть потрапляти в легені людини. Мікрочастинки розміром до 0,01 мкм видаляються разом із видихуваним повітрям, тоді як частинки від 5 до 10 мкм осідають у носоглотці.

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 фиброгенної 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, ^{o}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, ^{o}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 Іа					

Як показує таблиця, згідно з гігієнічною класифікацією праці, на умови роботи інженера-дослідника в електросталеплавильному цеху найбільше впливають такі чинники, як температура та вібрації.

4.2 Розробка заходів безпеки від впливу небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища

Для попередження травм працівників відстань від підлоги робочої платформи до нижньої частини рами завантажувальної машини повинна бути не меншою за 600 мм, а від відсіків із заправними матеріалами — не меншою за 400 мм. Ходові колеса завантажувальних машин необхідно закривати кожухом із зазором між рейками і кожухом не більше 10 мм. Завантажувальні машини слід оснащувати звуковими сигналами та гальмами миттєвої дії. Для запобігання вибухам забороняється завантажувати вологі матеріали в розплавлений метал. Для просушування руди та бокситу необхідно встановлювати сушильні агрегати.

Задля забезпечення безпеки при переміщенні складу з чавуном ковші мають бути розташовані вперед, а укладач або зчіплювач — перебувати попереду складу. Швидкість руху складу не повинна перевищувати 4 км/год. Щоб уникнути розбризкування чавуну під час його зливу з ковша, заливний ковш має бути розташований нижче верхнього краю основного ковша на 100–150 мм, а також необхідно регулярно очищати його від скрапу та своєчасно ремонтувати.

Для створення безпечних і комфортних умов праці ширину платформи біля печі роблять не меншою за 2,5 м. Захист працівників від теплового випромінювання забезпечують водоохолоджуваними теплоекранами та знімними огорожами. Пульти управління встановлюють між колонами печного прольоту навпроти печей, забезпечуючи їх вентиляцією. Для захисту від теплового випромінювання вікна пультів склять товстим склом 10–15 мм завтовшки.

Під час виконання робіт необхідно використовувати відповідний спецодяг. Перед початком роботи кожен працівник має бути акуратно одягнений, взутий, а спецодяг повинен бути застебнутим. Сталевари та їхні підручні повинні носити суконний одяг, рукавиці, черевики та каску (брюки поверх взуття, куртка поверх штанів, волосся сховане під головний убір). Майстри також мають бути в суконному одязі, рукавицях, черевиках і касці.

Залежно від характеру виконуваної роботи та її умов необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту: окуляри (сині — для захисту від інфрачервоного випромінювання, білі — від пилу), беруші (від шуму), респіратор «Пелюстка», протигази (для захисту від пилу чи шкідливих речовин), каску та вачаги (для запобігання контакту зі нагрітими поверхнями).

Для захисту від впливу виробничого шуму в умовах сталеплавильного цеху використовуються протишумові вкладиші з матеріалу ФПП-Ш. Ці вкладиші, відомі також як беруші, призначені для одноразового використання протягом робочого дня. Окрім цього, застосовуються шумозахисні навушники.

Система захисту від шуму та вібрації в цеху включає забезпечення герметичності повітроводів, газопроводів, арматури, кожухів печей та повітронагрівальних пристроїв. Автоматизація та механізація виробничих процесів відіграють важливу роль у зниженні впливу шуму й вібрацій.

Захист від ураження електричним струмом забезпечують за допомогою гумових рукавиць, гумових килимків, а також шляхом обов’язкового заземлення всіх металевих поверхонь у цеху.

Для захисту від інфрачервоного випромінювання на робочих місцях сталеварів передбачено встановлення теплозахисних водоохолоджувальних екранів. Вони локалізують джерела променистого тепла, знижують рівень опромінення на робочих ділянках і зменшують температуру навколишніх поверхонь.

4.3 Заходи з електробезпеки

Під впливом електричного струму можуть виникати електротравми, такі як електричний удар та опіки. Електричний удар можливий при контакті з провідними елементами обладнання. Опіки зазвичай викликані електричною дугою, яка виникає під час комутаційних процесів у електричних колах.

Внутрішньоцехові електромережі облаштовуються ізольованими проводами або кабелями із захисною оболонкою, яка відповідає вимогам експлуатації щодо механічної міцності та стійкості до зовнішніх впливів. Для звичайного освітлення напруга не повинна перевищувати 250 В. У приміщеннях з підвище-

ною або особливою небезпекою для освітлювальних приладів місцевого використання, ремонтного освітлення та ручного інструменту напруга обмежується до 36 В. Вертикальні та горизонтальні відстані між проводами і землею, транспортними шляхами, будівлями чи іншими об'єктами регламентовані. Нормуються також мінімальні допустимі перетини проводів, щоб забезпечити їхню механічну міцність і уникнути обривів.

Для захисту від контакту з провідними частинами здійснюється розташування таких елементів у недоступних місцях: на висоті, у підлозі або приховано у стінах. Мінімальна висота підвішування відкритих проводів становить 3,5 м (за винятком ситуацій, де вимагається збільшена висота для запобігання зачепленню предметами із землі або транспортом). Найменша допустима відстань до працюючих пристроїв при напрузі 15 кВ складає 0,7 м, а при напрузі 220 кВ — 3 м.

Відкриті струмоведучі частини, до яких люди можуть доторкнутися, обов’язково захищають у випадках, коли напруга перевищує 65 В у звичайних приміщеннях і 36 В — у приміщеннях із підвищеною небезпекою. Якщо напруга перевищує 250 В, захищати потрібно не лише відкриті, але й ізольовані провідники. Устаткування забарвлюють у стандартно встановлені кольори: це має як естетичне та розпізнавальне значення, так і забезпечує додатковий захист. Завдяки ізоляційним властивостям покриття знижується ризик утворення електричного кола через тіло працівника в аварійних ситуаціях.

Як захисні ізоляційні засоби можуть застосовуватися електроізоляційні лаки, плівки, емалеві або олійні фарби.

4.4 Заходи пожежної безпеки

Пічний проліт електросталеплавильного цеху належить до пожежонебезпечної категорії Г, оскільки його діяльність пов’язана з обробкою негорючих матеріалів у гарячому або розплавленому стані із впливом променистого тепла й відкритого полум’я; як паливо застосовується газоподібне паливо. Будівля вико-

нана з вогнестійких матеріалів, таких як сталь і залізобетон, і має І ступінь вогнестійкості.

У цеху можливі ситуації, коли рідкий метал або шлаки потрапляють на вологу підлогу, ґрунт, матеріали чи конструкції. Це може спричинити вибухи з викидом рідкого металу або шлаків. Вибухи у фурмах становлять значну небезпеку — під час них звід може відкриватися, і через фурмений канал на робочий майданчик викидаються розпечений кокс і гази. Ці речовини запалюються в атмосфері, утворюючи довге полум’я.

Для обмеження поширення пожежі використовуються негорючі матеріали, такі як азбест чи спеціальна вата. На місцях введення газопроводів у підвальні приміщення електросталеплавильного цеху встановлюються дренажні пристрої, які перешкоджають проникненню газу.

Пожежне депо розташоване за 4 кілометри від цеху. Зовнішнє пожежогасіння здійснюється від кільцевої водопровідної мережі та протипожежного водогону з пожежними гідрантами. Витрата води для гасіння пожеж становить 40 л/с з розрахунку на одну одноразову пожежу. Для боротьби із загораннями передбачені автоматичні установки аерозольного та порошкового модульного пожежогасіння (АУП), які виявляють осередок пожежі, подають сигнал черговому персоналу і забезпечують локалізацію та ліквідацію займання на ранній стадії.

Для безпечної евакуації людей із цеху у разі пожежі облаштовано евакуаційні шляхи. Швидкість руху під час примусової евакуації становить 16 м/хв. Максимальна допустима довжина шляхів евакуації не перевищує 50 м у виробничих будівлях І та ІІ ступенів вогнестійкості категорії А з одним поверхом. Сумарна ширина шляхів евакуації та виходів розраховується, виходячи зі співвідношення 0,6 м на кожні 100 осіб. Передбачено щонайменше два евакуаційні виходи, бажано розташовані на протилежних сторонах приміщення.

Для виявлення пожеж у приміщеннях використовуються теплові й димові сповіщувачі таких марок, як З-2000-СМК. Біля зовнішніх виходів встановлюються ручні пожежні сповіщувачі марки «Болид ИПР-513-3А». Пожежна сигналіза-

ція призначена для виявлення загорянь та видачі світлових і звукових сигналів про активацію сповіщувачів.

4.5 Технічні рішення виробничої санітарії

4.5.1 Опалення та вентиляція цеху

У пічному прольоті електросталеплавильного цеху через інтенсивне виділення надлишкового тепла виникає потреба у значному повітрообміні, особливо влітку. Вентиляція здійснюється шляхом переміщення повітря: видалення забрудненого з приміщення та надходження свіжого всередину. Природний повітрообмін у виробничому приміщенні електросталеплавильного цеху відбувається під впливом двох основних чинників: різниці температур, яка створює тепловий тиск, та дії вітру, який утворює вітровий тиск.

Таблиця 4.2 – Оптимальні параметри повітряного середовища в робочій зоні виробничих приміщень (прийняті допустимі значення)

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

Для забезпечення припливу свіжого повітря в цеху облаштовано прорізи у зовнішніх стінах, причому їхній нижній край розташований на висоті 2 метри. Для підсилення ефекту теплового тиску передбачено витяжні шахти, розташовані на будівлі цеху. На цих шахтах встановлено дефлектори, які сприяють збільшенню повітрообміну завдяки використанню сили вітрового напору. Таке розташування отворів забезпечує регулювання повітрообміну: у літній період відкривають обидва ряди отворів для максимального руху повітря, а взимку закри-

вають нижні прорізи, що зменшує втрати тепла. У результаті попередньо нагріте приміщенням повітря досягає робочих зон зі збереженням його температури.

У зоні позапічної обробки металу спостерігається інтенсивне інфрачервоне випромінювання на рівні 1000 Вт/м², що перевищує встановлені гранично допустимі значення.

Засоби захисту від випромінювання включають використання спеціального одягу, що складається з костюма зі щільної тканини, захисних окулярів темно-синього кольору, черевиків, рукавиць і каски. Також обов'язковим є дотримання інструкцій: під час переливання рідкого металу заборонено перебувати в небезпечній зоні з радіусом 5-6 метрів.

4.5.2 Освітлення виробничих приміщень

У пічному прольоті електросталеплавильного цеху передбачено як природне, так і штучне освітлення. Для забезпечення природного освітлення будівля цеху має світлові прольоти в стінах, площа яких становить 20% від площі підлоги. Нормативний коефіцієнт природної освітленості дорівнює 1%.

У випадках, коли природного освітлення недостатньо, використовується штучне освітлення з мінімальною нормою освітленості 300 люксів відповідно до вимог. Для цього застосовуються лампи накалювання типу НБ з потужністю 60 і 100 Вт та лампи НГ потужністю 500 Вт. Світлова віддача ламп збільшується зі зростанням їхньої потужності, однак не перевищує значення 18 лм/Вт. Термін служби таких ламп зазвичай становить близько 1000 годин.

Особливістю роботи в цеху є наявність у полі зору робітників джерел сильного світіння, наприклад полум'я, розплавленого та нагрітого металу чи шлаку. Яскравість нагрітого металу варіюється від 71500 до 112000 нт. У цих умовах потрібно безпосередньо розглядати світні поверхні для здійснення спостережень за процесом, оцінки температури "на око", визначення якості металу та шлаку тощо.

З цієї причини необхідно створювати певний рівень яскравості поля адаптації, тобто забезпечувати належний рівень освітленості навколишніх об’єктів. При цьому освітленість території прийнята на рівні до 5 люксів. Електропостачання освітлювальних приладів заплановане від нових джерел живлення у цеху з напругою 380/220 В. Згідно з умовами запиленості, коефіцієнт запасу світильників становить 1,7.

Відповідно до норм, у гарячих цехах, де працюють із світними матеріалами чи виробами, передбачено найменший розмір об’єктів для розрізнення понад 0,5 мм. Зоровий розряд роботи в цих умовах класифікується як VII. Коефіцієнт природної освітленості при комбінованому освітленні становить 2,7%, при звичайному освітленні — 0,9%.

4.5.3 Санітарно-побутові приміщення

Для забезпечення належних умов праці в електросталеплавильному цеху, де характерні значні тепловиділення, важливим аспектом є раціональний режим роботи та відпочинку. Це передбачає організацію регламентованих перерв, створення відпочинкових кімнат з кондиціонованим повітрям, а також водяні процедури, такі як напівдуш, обмивання і обтирання. Робота в умовах надлишкового тепла безперервно не має тривати понад 10 хвилин, а після другої години роботи повинна надаватися 15-хвилинна перерва, яка проводиться в кімнаті відпочинку.

Щоб сприяти адаптації до робочих умов, молоді працівники, співробітники після перенесених захворювань чи після відпустки в перші 2-3 тижні повинні виконувати легку та середньої складності роботу із поступовим збільшенням навантаження. У цьому періоді передбачаються обов’язкові 8-10-хвилинні перерви для відпочинку.

Кімнати відпочинку облаштовуються в герметичних і звукоізольованих приміщеннях із рівнем шуму не більше 50 дБ, де передбачено кондиціонування повітря, встановлення автоматичних систем ОМ-1 для оксигенопрофілактики,

напівдуші й крісла для забезпечення максимальної комфортної пози для розслаблення м’язів.

Окрім технічних, планувальних та інших заходів, спрямованих на зменшення впливу виробничих факторів, значну увагу приділяють підвищенню опірності організму працівників. Це досягається завдяки медико-санітарному забезпеченню, що включає: а) медичні огляди: попередні при прийомі на роботу та періодичні під час трудової діяльності у шкідливих умовах; б) лікувально-профілактичне харчування; в) використання адаптогенів та природних лікарських засобів для профілактики негативного впливу факторів виробничого середовища.

Для підтримання вітамінного балансу робітникам рекомендовано напої на основі чаю з вітамінами та молочнокислі продукти, а питні пункти повинні бути розташовані в безпосередній близькості до робочих місць. Раціон харчування має бути різноманітним і збагаченим вітамінами.

З метою посилення стійкості організму до температурних перепадів, простуди та інших захворювань рекомендовано регулярне відвідування оздоровчих комплексів, що включають водні процедури (сауна, басейн, душ, обтирання), інгаляторій, фізіотерапевтичний кабінет та подібні заходи.

4.5.4 Виробничий шум

Рівень шуму в пічному прольоті електросталеплавильного цеху не перевищує 80 дБ, що відповідає нормативам гранично допустимого рівня (ПДР) шуму. Враховуючи це, немає необхідності у впровадженні спеціальних будівельних рішень, конструкцій чи обладнання для додаткового захисту. Однак високий рівень шуму може призводити до загальнобіологічних змін, функціональних розладів, механічних ушкоджень, які подекуди стають причиною професійних захворювань, таких як приглухуватість, розрив барабанної перетинки (при шумі 120-140 дБ), порушення серцево-судинної діяльності чи функцій шлунка.

Основними джерелами шуму в цеху є дугова піч, технологічне обладнання (мостові крани, насоси, автонавантажувачі та інші механізми), а також сопла фурм, через які кисень рухається зі швидкістю звуку.

Для мінімізації рівня шуму в приміщенні цеху передбачено такі заходи:

- ізоляція обладнання у спеціальних укриттях, що сприяє зниженню шуму поблизу технологічного оснащення;

- винесення вентиляційного обладнання в окремі приміщення або за межі будівлі цеху;

- встановлення вентиляторів на віброізолюючих підставах з використанням гнучких вставок для їх з'єднання з повітропроводами;

- застосування звуковбирних матеріалів для обробки стін;

- використання індивідуальних засобів захисту, таких як спеціальні шоломи і антифони (протишумні підшоломники та заглушки чашкової форми).

4.5.5 Засоби індивідуального захисту

Сталевар під час роботи має використовувати засоби індивідуального захисту, які відповідають вимогам безпеки та зручності. Спеціальний одяг повинен бути виготовлений із незаймистого, легкого, повітропроникного та стійкого до впливу променистої енергії матеріалу, такого як сукно, брезент чи хімічно оброблене волокно з металевим покриттям. Для захисту очей необхідно застосовувати світлофільтри у вигляді окулярів або щитків.

Щоб захистити органи дихання від пилу, використовуються респіратори, такі як пилозахисна маска. Органи слуху захищаються за допомогою берушів. Для роботи поблизу високотемпературних джерел, наприклад печей, використовують окуляри зі світлофільтром, до скла яких входять типи СС4 або СС11. Окуляри кріпляться до козирка або каски і виробляються зі спеціального скла жовто-зелених чи синіх відтінків.

Обов'язковим є спеціальне шкіряне взуття. Передня частина таких черевиків має глухий дизайн, забезпечений додатковою прокладкою з еластичного поропласта чи кількох шарів бавовняної тканини. Підошва виробляється зі спеціальної хромової шкіри для максимального захисту та довговічності.

Місце для відпочинку має бути ізольоване від виробничої площі склоблоками. Для нього відводиться площа 2-3 м² з висотою 2,3 м. У перекритті передбачається система природної вентиляції для нейтралізації теплової подушки повітря.

4.6 Розрахунок межі вогнестійкості суцільних конструкцій при односторонньому обігріві (за ознакою прогріву)

Обчислення межі вогнестійкості бетонної стіни потрібне для того, щоб розуміти, скільки споруда зможе витримати у вогні під час пожежі. Обчислення проводиться для умов «стандартної» пожежі, при якій температура змінюється в часі за логарифмічним законом:

$$t_п = 345 \cdot \lg \cdot (0{,}133 \cdot \tau + 1) + t_н, \tag{4.1}$$

де $t_п$ - температура пожежі, °С;

$t_н$ - початкова температура конструкції (приймаємо рівною 20, °С);

τ - час, сек.

Щодо бетонних та інших неметалевих стін, плит, межа вогнестійкості обчислюється за показником прогріву. Визначають час, за який температура поверхні, що нагрівається, підніметься на 160 К. Цей час і буде межею вогнестійкості споруди.

Межа вогнестійкості, хв.:

$$\tau = 6{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(\delta + 60 \cdot K \cdot \sqrt{a})^2}{\mu_1^2 \cdot a} \cdot \lg \frac{A_1}{0{,}13 - \frac{1}{1 + Bi}}, \tag{4.2}$$

де Bi - критерій Біо;

d - товщина стіни, м;

a - коефіцієнт, що залежить від щільності матеріалу стіни в сухому вигляді;

μ_1, A_1 - коефіцієнти, які залежать від критерію Біо.

Критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (\delta + 60 \cdot K \cdot \sqrt{a}), \tag{4.3}$$

де α - середній за часом коефіцієнт тепловіддачі від необігрівальної поверхні, Вт/м^{2}К;

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу стіни, що приймається при температурі 250 °С, Вт/мК.

Коефіцієнт тепловіддачі знайдемо за емпіричною формулою:

$$\alpha = 4{,}8 + 9{,}1 \cdot \varepsilon, \tag{4.4}$$

де ε - ступінь чорноти не обігрітої поверхні (для бетону ε = 0,67).

Коефіцієнт температуропровідності:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \tag{4.5}$$

де с - середня теплоємність матеріалу (при температурі 250 °С), Дж/кгК;

ρ - щільність матеріалу, кг/м^3.

Для бетону коефіцієнт температуропровідності залежить від початкового вагового вмісту вологи W, % :

$$a = \frac{\lambda}{(c + 50 \cdot W) \cdot \rho}, \tag{4.6}$$

тут с і р беремо для сухого бетону. Значення W приймаємо рівним 2 %, теплоємність сухого бетону при температурі t = 250 °С приймаємо рівною 6Дж/кг · К, щільність сухого бетону 2066 кг/м^3.

Коефіцієнт теплопровідності розраховується так:

$$\alpha = 1{,}15 - 0{,}35\frac{t}{1000} = 1{,}15 - 0{,}35 \cdot \frac{250}{1000} = 1{,}06 \quad \text{Вт / м} \cdot \text{К}. \qquad (4.7)$$

Коефіцієнт температуропровідності:

$$a = \frac{1{,}06}{(756 + 50 \cdot 2) \cdot 2066} = 6 \cdot 10^{-7} \quad \text{м}^2/\text{с}. \qquad (4.8)$$

Критерій Біо:

$$Bi = \frac{10{,}9}{1{,}06} \cdot (0{,}6 + 60 \cdot 0{,}6 \cdot \sqrt{6 \cdot 10^{-7}}) = 6{,}46. \qquad (4.9)$$

За довідником: μ_1=2,739, A_1=-0,255.

Межа вогнестійкості:

$$\tau = 6{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(0{,}6 + 60 \cdot 0{,}6 \cdot \sqrt{6 \cdot 10^{-7}})^2}{2{,}739^2 \cdot 6 \cdot 10^{-7}} \cdot \lg \frac{-0{,}255}{0{,}13 - \frac{1}{1 + 7{,}46}} = 101 \quad \text{хв} = 1{,}68 \text{ г}. \qquad (4.10)$$

Висновок: Цим розрахунком визначено ступінь вогнестійкості будівлі цеху, яка описує його спроможність протистояти руйнуванню в умовах займання. Таким чином, за умов пожежі будівля з бетонними стінами завтовшки 0,6 м не зазнає руйнування протягом 101 хвилини (1,68 години).

ВИСНОВКИ

1. Шарикопідшипникову сталь вживають головним чином для створення кульок, роликів та обідків підшипників. За складом і властивостями її можна віднести до групи інструментальних сталей, але за використанням вона є конструкційною спеціального призначення. Високий вміст вуглецю в цих сталях гарантує добру стійкість її проти стирання. Підвищений вміст хрому, марганцю та кремнію посилює прогартовування сталі.

2. Природа неметалевих домішок у шарикопідшипниковій сталі, їхня кількість та розміри визначаються технологією її витоплення та розливання.

3. Найбільш доцільним є початкове вилучення кисню завдяки реакції з вуглецем у вакуумі, аби при фінальному розкисленні сталі феросплавами утворилася мінімальна кількість домішок.

4. При обробці сталі вакуумом у ковші можливе одночасне протікання двох протилежних процесів: розкислення сталі та часткове відновлення вуглецем найменш міцних оксидних неметалевих домішок і процесу забруднення сталі вогнетривами ковша та стопора, що руйнуються. Отже, зміна вмісту загального кисню та неметалевих домішок у сталі залежить від результату цих процесів.

5. Лише поглиблення вакууму не може спричинити покращення якості кульової підшипникової сталі.

6. Класична технологія проведення відновлювального етапу електроплавлення, що передбачає глибоке розкислення сталі у печі кремнієм та алюмінієм, не може забезпечити високого ступеня чистоти кульової підшипникової сталі за неметалевими домішками.

7. У праці створено нову технологію витоплення шарикопідшипникової сталі, що базується на наступних початкових положеннях:

• до моменту випуску плавки у розчині металу не повинно бути потужних розкислювачів;

• відновлювальний етап проводити без використання феросиліцію та алюмінію;

• випущений з печі метал без кремнію та алюмінію піддавати вакуумуванню у ковші, де метал буде інтенсивно розкислюватися вуглецем;

• феросиліцій та алюміній вводити у метал під вакуумом наприкінці етапу вакуумування для фінального розкислення, але переважно для легування сталі.

Така технологія спричинила підвищення якості шарикопідшипникової сталі, зменшення балів оксидних та глобулярних домішок у ній та значну економію феросплавів.

8. Зниження вмісту водню у шарикопідшипниковій сталі, витопленій за новою технологією, коливається у межах 32-68%, тоді як при обробці вакуумом у ковші шарикопідшипникової сталі, витопленої за прийнятою раніше технологією, вміст водню знижувався у середньому лише на 18,7%. Вміст розчиненого у металі азоту зменшується у середньому на $3 \cdot 10^{3}$%, що відповідає зниженню його концентрації на 40-45%.

9. Тривалість відновлювального етапу у межах 1 год. 20 хв. - 3 год. 00 хв. фактично не впливає на забрудненість сталі оксидами.

10. Встановлено нерівномірний вміст домішок по висоті металу у ковші.

11. Вплив глибини вакууму на якісні показники сталі виявляється лише до межі 20-25 мм.рт.ст. Подальше поглиблення вакууму до 5-10 мм.рт.ст. практично не впливає на зміну балу оксидних та глобулярних домішок.

12. Для покращення рівномірності розподілу кремнію в обсязі металу було вирішено перейти до використання 45%-ого феросиліцію замість 75%-ого, оскільки густина першого значно більша.

13. Оскільки у відновлювальний етап плавки не входить розкислення металу кремнієм та алюмінієм, то зникає потреба у витримці ванни для забезпечення спливання продуктів розкислення, що було необхідним при старій технології витоплення сталі. Тому плавка скоротилася у середньому на 20 хв., це забезпечило зростання продуктивності печей на 7% при одночасному скороченні витрат електроенергії на 16,7 кВт·год./т.

14. Попереднє розкислення металу вуглецем під вакуумом за новою технологією зменшує витрату феросплавів, призначених для фінального розкислення

сталі та доведення складу металу до заданого по марці. Витрата феросиліцію знижується на 2,51 кг/т та алюмінію - на 0,65 кг/т.

15. Фінальне розкислення металу у вакуумі спричиняє зменшення у готової сталі кількості стійких неметалевих домішок.

16. У шарикопідшипниковій сталі після промислового впровадження нової технології вміст неметалевих стійких домішок знизився з 0,0055 до 0,0026%, тобто у два рази.

17. Зменшення кількості та зниження балу домішок дозволило суттєво підвищити якість шарикопідшипникової сталі: брак по домішках знизився у 10 разів (з 2,22 до 0,22%), а кількість претензій по цій сталі зменшилася приблизно у 60 разів (з 7,07 до 0,12%). Внаслідок впровадження нової технології собівартість 1 т шарикопідшипникової сталі зменшилася, проте на підставі детального дослідження металу плавок можна зробити попередні висновки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Zhang L., Thomas B.G. Inclusions in continuous casting of steel. *XXIV National Steelmaking Symposium, Morelia*. Mich. – Mexico, 26...28 Nov. 2003. P. 138-183.
2. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. Киев-Донецк : Высшая школа, 1979. 280 с.
3. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник для металург. спец. вищ. навч. закл. / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський [та ін.] ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.
4. Дурягіна З. А., Лизун О. Я., Пілюшенко В. Л. Сплави з особливими властивостями : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів. Львів : Львівська політехніка, 2007. 236 с.
5. Теорія будови рідкого, аморфного і кристалічного стану (об’єм поверхні та поверхня в об’ємі) : монографія / М.М. Бережний та ін. Кривий Ріг : «Мінерал», 2007. 291 с.
6. Смірнов О. М., Макуров С. Л., Сафонов В. М. Виробництво зливків сталі та промислових сплавів : навч. посіб. Донецьк : Ноулідж, 2013. 405 с.
7. Попович В. В., Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Львів : Світ, 2006. 624 с.
8. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів. Київ : Кондор, 2006. 528 с.
9. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. / А. М. Верховлюк, А. В. Нарівський, В. Г. Могилатенко. За ред. академіка НАН України В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224 с.
10. Збожна О. М. Основи технологій : навч. посіб. Тернопіль : Картбланш, 2002. С. 30–58.

11. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Київ : Наука, 2005. С. 45−48.
12. Сталеплавильне виробництво: навч. посіб. / В.І. Баптизманський та ін.]. Київ : ФЗМН, 1996. 400 с.
13. Збірник технологічних інструкцій з виплавки сталі у відкритій дуговій печі. Запоріжжя: ПрАТ «Дніпроспецсталь», 2004. 245 с.
14. Державні санітарні правила "Підприємства чорної металургії" ДСП 3.3.1.038-99.
15. Наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».
16. Наказ МОЗ України «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони» 14.07.2020 № 1596.
17. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.
18. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вібраційна безпека. Загальні вимоги.
19. ДСТУ 3038-95 Гігієна. Терміни та визначення основних понять.
20. ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартів безпеки праці. Одяг спеціальний для захисту від підвищених температур теплового випромінювання, конвективної теплоти. Загальні технічні вимоги (ГОСТ 12.4.221-2002, IDT).
21. НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок (ДНАОП 1.1.10-1.01-97).
22. 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)).
23. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
24. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.

ДОДАТОК А

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

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

ІНЖЕНЕРНІ ІННОВАЦІЇ ТА РОЗБУДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

Матеріали
ІІ Міжнародної науково-практичної конференції
Інженерного навчально-наукового інституту
ім. Ю. М. Потебні

15–16 травня 2025 року

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

УДК 669.18.046-982

Мороз Сергій Миколайович
здобувач вищої освіти другого освітнього рівня, 1 курс,
кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

Кириченко Олексій Геннадійович
к. т. н., доцент, доцент кафедри металургійних технологій,
екології та техногенної безпеки
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ВАКУУМУВАННЯ ШАРИКОПІДШИПНИКОВИХ СТАЛЕЙ

Актуальність. Підшипники є ключовими компонентами багатьох машин, таких як верстати, автомобілі, трактори, вагони та електродвигуни. Вони визначають точність і продуктивність цих механізмів. Робота підшипників базується на обертанні кульок або роликів по зовнішньому і внутрішньому кільцях. Найчастіше відмови підшипників виникають через поломку або руйнування тіл обертання і робочих поверхонь кілець, а також через втомлююче викришування поверхонь елементів підшипника.

Для їх виготовлення зазвичай використовують високовуглецеву хромисту сталь ШХ15 (0,95–1,05 % C і 1,3–1,65 % Cr), а великого перерізу – хромомарганцевокремністу сталь ШХ15СГ (0,95–1,05 % C, 0,9–1,2 % Cr, 0,4–0,65 % Si і 1,3–1,65 % Mn), яку прожарюють на велику глибину. Сталі мають високу твердість, зносостійкість і опір контактної втоми. До сталей висувають високі вимоги щодо утримання неметалічних включень, так як вони викликають передчасне втомне руйнування.

Аналіз останніх досліджень. Найбільш повно інформація щодо використання коксу представлена у роботах [1; 2].

Мета. Дослідити фізико-хімічні особливості процесу вакуумування шарикопідшипникових сталей з метою вдосконалення технології та можливості регулювання процесу.

Основний текст. На початковому етапі шарикопідшипникова електросталь, виплавлена за встановленою технологією, проходила процес вакуумування у ковші.

При плавці сталі методом повного окислення передбачалося проведення окислювального періоду після розплавлення садки. У цей етап до шлаку додавали руду та вапно для підтримання його активності. Метал припиняли кип'ятити, коли вміст вуглецю у ванні становив не більше 0,85 %. Температура металу перед видаленням окисного шлаку варіювалася від 1560 до 1590 °С.

Після завантаження окислювального шлаку у метал додавали хром і марганець. Потім формували новий шлак із використанням вапна, плавикового шпату та шамотного матеріалу. У відновлювальному періоді шлак знешкоджували, додаючи порошкоподібний кокс, і герметично закривали піч на 25 хвилин.

Після цього піч відкривали, а метал у ванні ретельно перемішували. У другій половині відновлювального періоду до шлаку додавали порошкоподібний 75-відсотковий феросиліцій, рівномірно розподіляючи його по поверхні ванни. Загалом вносили 4–5 порцій феросиліцію по 15 кг кожна, що сприяло знесірчуванню металу. За 2–5 хвилин до випуску ванну розкислювали алюмінієм, який занурювали у метал на штангах у кількості 500 г/т.

Потім метал перемішували за допомогою спеціальних гребків і випускали. Загальний час відновлювального періоду за такою технологією становив 1,5–2 години.

На експериментальних плавках загальні положення технології зберегли, змінивши лише температурний режим: температура випуску металу була підвищена до 1580–1610 °С порівняно з 1530–1560 °С для звичайних плавок. Відповідно, температуру металу в окислювальному періоді також підвищили на 30 °С. Для проведення вакуумування використовували ковші ємністю 20 тонн, які забезпечували запас висоти над поверхнею шлаку близько 600 мм – це було критично важливим для проведення процесу вакуумування. Після завершення плавки та вимірювання температури ківш із металом опускали у вакуум-камеру, з'єднану із системою станції, де заздалегідь створювали вакуум із залишковим тиском 1,5–2 мм рт. ст. Насоси запускали за 5–8 хвилин до початку вакуумування. Через великий оглядовий отвір у кришці камери можна було спостерігати значну частину поверхні шлаку в ковші, контролюючи стан вогнетривких матеріалів ковша й стопора.

Спостереження показали, що при досягненні тиску 40–50 мм рт. ст. на поверхні шлаку утворювалися тріщини, через які пробивався полум'яний вогонь. З подальшим зниженням тиску (15–20 мм рт. ст.) шлак починав інтенсивно кипіти. При цьому шлак (а іноді й метал) піднімався вздовж стінок ковша на висоту до 200–300 мм, після чого інтенсивність кипіння зменшувалася.

На деяких плавках кипіння спостерігалося тільки біля стінок ковша і стопора, тоді як на інших воно активно відбувалося по всій поверхні

ковша до завершення процесу вакуумування. Тривалість обробки металу вакуумом після досягнення остаточного тиску 15–20 мм рт. ст. зазвичай становила понад 5–6 хв.

Результати вакуумування. Попередні дослідження, проведені на заводі «Дніпроспецсталь», засвідчили, що вакуумна обробка шарикопідшипникової сталі, отриманої за технологією, подібною до згаданої, не привела до суттєвого покращення чистоти сталі щодо неметалевих включень.

Ймовірною причиною цього могла бути недостатня потужність обладнання, яке забезпечувало залишковий тиск у межах 25–40 мм рт. ст. На першому етапі нашої роботи було поставлено завдання перевірити ефективність вакуумування електросталі, виплавленої за стандартною технологією, але обробленої в умовах зниженого залишкового тиску 5–10 мм рт. ст.

Досліджувався вплив ступеня вакууму і тривалості процесу на рівень дегазації та розкислення металу, а також на якісні показники сталі. Для визначення змін умісту газів (водню, азоту та кисню) використовували метод пробо-знімання спеціальними пристроями до та після вакуумування. Отримані зразки металу відразу гартували у воді й зберігали у середовищі вуглекислого газу або спирту до моменту аналізу. При підготовці зразків застосовували заходи для мінімізації втрат газів. Аналіз проводився методом вакуумного нагрівання для визначення водню та вакуумного плавлення для азоту і кисню.

Результати свідчать, що при вакуумуванні шарикопідшипникової сталі стандартної технології відбувалося видалення 0,5–1,5 $см^3$ водню та зниження вмісту азоту на $0{,}5–1{,}8\times10^{-3}$ %. Водночас обробка вакуумом сталі на заводі «Дніпроспецсталь» при залишковому тиску 25–40 мм рт. ст. дозволяла знизити вміст водню на 0,3–1,7 $см^3/100$ г, однак істотного зменшення азоту досягнуто не було. Проте при вакуумуванні киплячої бесемерівської сталі навіть за відносно високого залишкового тиску (70–100 мм рт. ст.) спостерігалося зниження вмісту азоту на 30–50 %.

Систематичних змін у вмісті кисню в металі внаслідок вакуумування виявлено не було: на дев'яти плавках рівень кисню зріс, тоді як лише на двох він дещо знизився. Електросталь, піддана дифузійному розкисленню кремнієм і додатковому розкисленню алюмінієм, характеризувалася дуже низьким умістом кисню, основна частина якого знаходиться у формі неметалевих включень.

Метод вакуумного плавлення дозволяє визначати загальний уміст кисню, враховуючи як той, що розчинений у сталі, так і той, що входить до складу оксидних неметалевих включень. Незакономірні зміни у показниках кисню можуть бути наслідком перерозподілу неметалевих включень під час вакуумної обробки.

Висновки. Під час обробки сталі вакуумом у ковші можуть одночасно відбуватися два протилежні процеси: розкислення сталі та часткове

відновлення вуглецем найменш міцних оксидних неметалічних включень, а також забруднення сталі матеріалом ковша і стопора, які розмиваються. Отже, зміна вмісту загального кисню і неметалічних включень у сталі зумовлюється результуючим ефектом цих процесів.

Список використаних джерел

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник для металург. спец. вищ. навч. закл. / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський [та ін.] ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища шк., 2006. 503 с.
2. Смірнов О. М., Зборщик О. М. Позапічне рафінування чавуну і сталі : навчальний посібник. Донецьк : Ноулідж, 2013. 179 с.

УДК 338.45:669(477)«2022/...»

Нестеренко Тетяна Миколаївна
к. т. н., доцент, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

Старій Євген Вікторович
стейкхолдер кафедри МТЕТБ, директор ТОВ «СЛАВУТИЧ-ТАРА», здобувач вищої освіти II освітнього рівня «магістр», спеціальність 136 Металургія Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

Гусаров Олег Олегович
стейкхолдер кафедри МТЕТБ, здобувач вищої освіти II освітнього рівня «магістр», спеціальність 136 Металургія Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

НОВІ ЕТАПИ РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ: ВИКЛИКИ ТА ТРЕНДИ ПІД ЧАС ВІЙНИ

Актуальність дослідження. Металургійна галузь України, як одна з основних складових національної економіки, останніми десятиліттями стикається з численними викликами, пов'язаними з глобальною економічною нестабільністю, внутрішніми політичними кризами та військовим конфліктом. Постійні коливання світового попиту на металопродукцію,