

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М.ПОТЕБНИ

Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота / проєкт**

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Удосконалення якості колісної сталі в процесах  
спецеелектрометалургії

Виконав: студент II курсу, групи 8.1362-мчм-3  
спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Металургія чорних металів

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

О.В.Ісенко

(ініціали та прізвище)

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

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

Рецензент доц., к.т.н., доц. Явтушенко А.В.

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

Запоріжжя  
2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« 07 » 05 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Ісенку Олегу Валентиновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Удосконалення якості колісної сталі в процесах спецеелектрометалургії

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

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

затверджені наказом ЗНУ від « 09 » жовтня 2023 року № 1581-с

2 Строк подання студентом роботи 10.12.2023


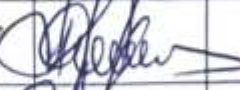

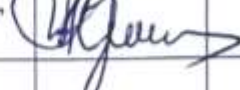
3 Вихідні дані до роботи Дослідити процеси удосконалення якості колісної сталі в процесах спеціальної металургії

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

Реферат; вступ; Загальна частина; Загальна характеристика сучасних методів спецеелектрометалургії; Технологічна частина; Охорона праці та техногенна безпека; Висновки; Перелік джерел посилання; Додаток А

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

## 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Загальна частина	Кириченко О.Г., доцент		
Загальна характеристика сучасних методів спецеелектрометалургії	Кириченко О.Г., доцент		
Технологічна частина	Кириченко О.Г., доцент		
Охорона праці та техногенна безпека	Кириченко О.Г., доцент		

7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

  
(підпис)

О.В.Ісенко

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)

  
(підпис)

О.Г.Кириченко

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

  
(підпис)

Ю.О.Белоконь

(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 7 табл., 10 рис., 1 дод., 26 джерел

КОЛІСНА СТАЛЬ, СПЕЦЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ, ЕШП, ВДП,  
ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ

Об'єкт дослідження – технологія виплавки колісної сталі в ЕШП та ВДП.

Предмет дослідження – закономірності і механізм впливу обробки колісної сталі на ЕШП та ВДП.

Мета роботи – розробити технологічні основи для поліпшення якості колісної сталі методами спецеелектрометалургії.

Методи дослідження – металографія, хімічний аналіз, статистичні випробування на межу текучості, опір розриву, дослідження в напівпромислових і промислових умовах, статистичний аналіз отриманих результатів.

Наукова новизна:

1. Встановлено, що в умовах ЕШП і на флюсі АНФ-6 (система  $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3, \text{CaO}$ ) можливе утворення в шлаку іонів  $\text{CN}^-$  і перенесення азоту в метал наведені оксидами типу  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Результати оцінки неметалічних включень показують, що найбільш чистий метал отриманий за спрощеним варіантом технології: відкрита дугова піч та електрошлаковий переплав.

2. Визначено, що в металі ВДП присутні сульфідні і оксидні включення, а силікатні включення настільки дисперсних, що, не можуть бути оцінені по застосовуваній шкалі.

Флокеночутливість металу дослідних коліс визначалася на всіх плавках. Дослідження показали, що всі колеса мають протифлокеновий імунітет.

Практичне значення:

1. Розроблені технологічні режими отримання якісної колісної сталі з подальшою обробкою на установці ЕШП типу ОКБ-1065.

2. Показана можливість використання технології в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь».

У розділі «Загальна частина» надано аналіз методів експлуатації та випробування сучасних колісних пар та представлені основні технології виплавки колісної сталі

У розділі «Загальна характеристика сучасних методів спецеелектрометалургії» представлений опис установки ЕШП типу ОКБ-1065, наведено основні принципи технології ЕШП, представлена установка печі ВДП та основні принципи технології ВДП.

У розділі «Технологічна частина» розглянуті вимоги щодо якості металу ЕШП та ВДП, наведені механічні властивості металів, отриманих методами ЕШП та ВДП, наведено теоретичні та експериментальні методи дослідження поведінки кисню у киплячій ванні мартенівських і електродугових печей і процесів розкислення вуглецевої колісної сталі.

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

Розроблена технологія рекомендується для дослідно-промислових випробувань в плавильних цехах спецеелектрометалургії України.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 Загальна частина.....	9
1.1 Методи експлуатації та випробування сучасних колісних пар .	9
1.2 Основні технології виплавки колісної сталі.....	14
2 Загальна характеристика сучасних методів спецеелектрометалургії ....	23
2.1 Установа ЕШП типу ОКБ-1065 .....	23
2.2 Основні принципи технології ЕШП.....	24
2.3 Установа печі ВДП .....	28
2.4 Основні принципи технології ВДП.....	28
3 Технологічна частина .....	33
3.1 Якість металу ЕШП .....	33
3.2. Якість металу ВДП .....	40
3.3 Механічні властивості металу ЕШП та ВДП.....	44
3.4 Теоретичні та експериментальні дослідження поведінки кисню у киплячій ванні мартенівських і електродугових печей і процесів розкислення вуглецевої колісної сталі .....	48
4 Охорона праці та техногенна безпека .....	55
4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища електросталеплавильного цеху.....	55
4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища електросталеплавильного виробництва .....	58
4.3 Заходи з електробезпеки .....	60
4.4 Заходи пожежної безпеки.....	61
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	65
ДОДАТОК А Публікації за темою кваліфікаційної роботи .....	68

## ВСТУП

Для металургійного комплексу України, сталеливарної промисловості, підвищення якості колісної сталі та суцільнокатаних коліс, що використовуються в рухомому складі наземного транспорту та метрополітену, є національним викликом. Розгалужена залізнична мережа України (понад 62 000 км) і добре розвинений рухомий склад є основною артерією водного транспорту поряд з автомобільними дорогами.

Як відомо, Україна є одним з основних експортерів суцільнокатаних коліс для рухомого складу та локомотивної стрічкової сталі, які експортуються до багатьох країн Європи, Азії та Сходу.

Зростання швидкостей пасажирського транспорту та осьових навантажень вантажних поїздів, безпека руху залізничного транспорту та високі вимоги до надійності і стійкості коліс при перевезенні спеціальних вантажів (джерела енергії, відпрацьоване ядерне паливо, оборонні об'єкти тощо) вимагають покращення комплексу фізико-механічних властивостей колісних сталей та експлуатаційних характеристик суцільнокатаних коліс.

У широкому сенсі проблема підвищення якості суцільнокатаних коліс може бути вирішена комплексно, у поєднанні з удосконаленням існуючих технологій виплавки і розливання сталі та науковими пошуками більш раціональних способів пресування заготовок, противикідних обробок і оптимізації параметрів термічної обробки (нагріву для гартування, прискореного охолодження і низькотемпературного відпуску). Однак зрозуміло, що якість кінцевого продукту в цій складній технологічній схемі виробництва коліс значною мірою залежить від вихідних властивостей сталі, виплавки металу в печі, позапічної обробки та впливу багатьох металургійних факторів на стадії розливання.

Підхід до вирішення комплексної проблеми підвищення якості колісних сталей визначив науковий напрямок теоретичних і

експериментальних досліджень, проведення дослідно-промислових випробувань в складних умовах виплавки сталі і, в кінцевому підсумку, забезпечив отримання великого обсягу експериментального науково обґрунтованого матеріалу.



## 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### 1.1 Методи експлуатації та випробування сучасних колісних пар

Колісна пара є основним несучим і напрямним пристроєм залізничного транспортного засобу, і її справність значною мірою впливає на безпеку руху.

Кожна колісна пара повинна відповідати вимогам Інструкції з огляду, ремонту та організації технічного обслуговування колісних пар залізничних транспортних засобів і мати чітке маркування на осі із зазначенням дати, часу і місця організації та проведення повного огляду колісної осі, а також відмітки про пропуск організації.

Знаки та маркування повинні бути розміщені в місцях, визначених правилами маркування.

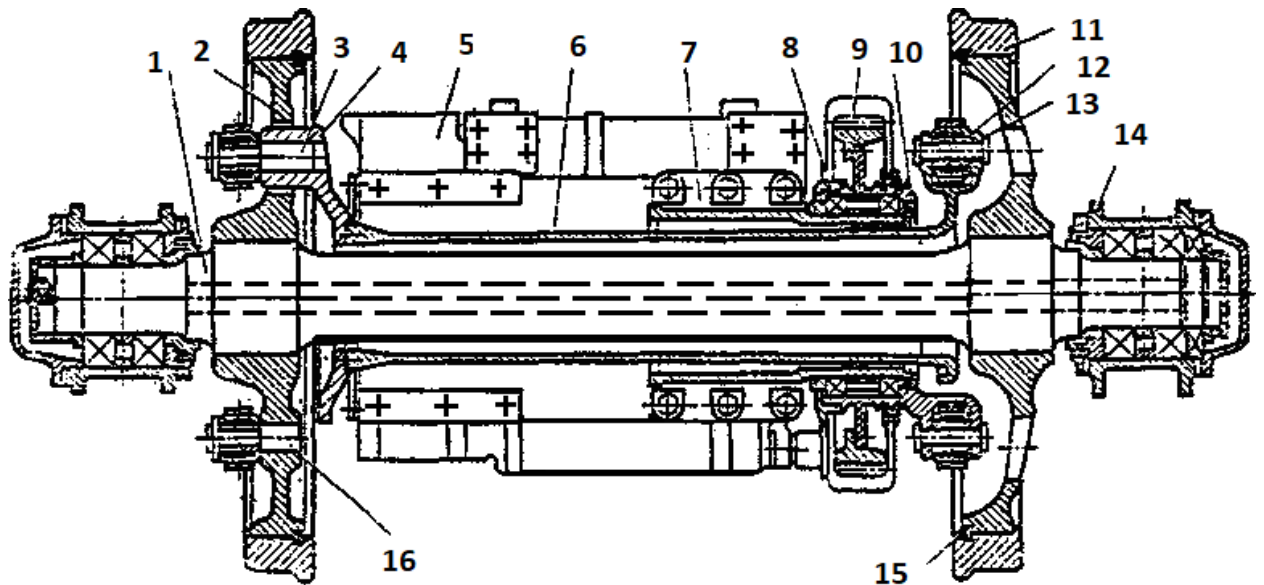
Колісні пари повинні піддаватися в установленому порядку технічним оглядам, періодичним оглядам і повним оглядам рейкових транспортних засобів і, якщо вони обкатані, повинні бути занесені до відповідного журналу або паспорта.

Найважливішим компонентом рейкового транспортного засобу є колісна пара.

Колеса відповідають за сприйняття навантаження від буксирувального транспортного засобу або транспортних засобів і спрямовують рух рейкового транспортного засобу по рейках. Справний стан колісної пари, своєчасне попередження та усунення несправностей, а також відповідність типу і вантажопідйомності колісної пари - найважливіші умови безперебійних перевезень.

Основними елементами кожної колісної пари тягового рейкового транспортного засобу є вісь, два колісні центри, які притискаються до осі, і два бандажі, які встановлюються на колісні центри під час нагрівання і закріплюються спеціальними кільцями.

У колісних парах електровозів та тепловозів на вісь або маточину колеса напресовані зубчасті колеса [1].



1 - вісь; 2 – колісний центр; 3, 16 – пальці; 4, 13 – приводні фланці; 5 – тяговий електродвигун; 6 - труба; 7 – опора; 8 – опорний підшипник; 9 – зубчастий вінець; 10 – приводний фланець зубчастого колеса; 11 – бандаж; 12 – гумометалевий шарнір; 14 – букса; 15 – бандажне кільце

Рисунок 1.1 – Колісна пара тепловоза ТЕП70 з приводом

На рисунку 1.1 показана двонаправлена зубчаста передача електровоза. Трансмсія складається з двох шестерень, встановлених на обох кінцях валу тягового двигуна, і двох шестерень постійного зачеплення, встановлених на центральній маточині колісної пари або подовженої колісної пари. Тяговий двигун спирається на підшипники на осі колісної пари, а з іншого боку - на систему пружин у рамі візка.

Колісні пари під локомотивами, електротягами та дизель-поїздами оглядаються машиністом під час відповідного огляду, приймання та здавання (при відправленні та прибутті) в локомотивному, електротяговому та дизель-поїзному депо.

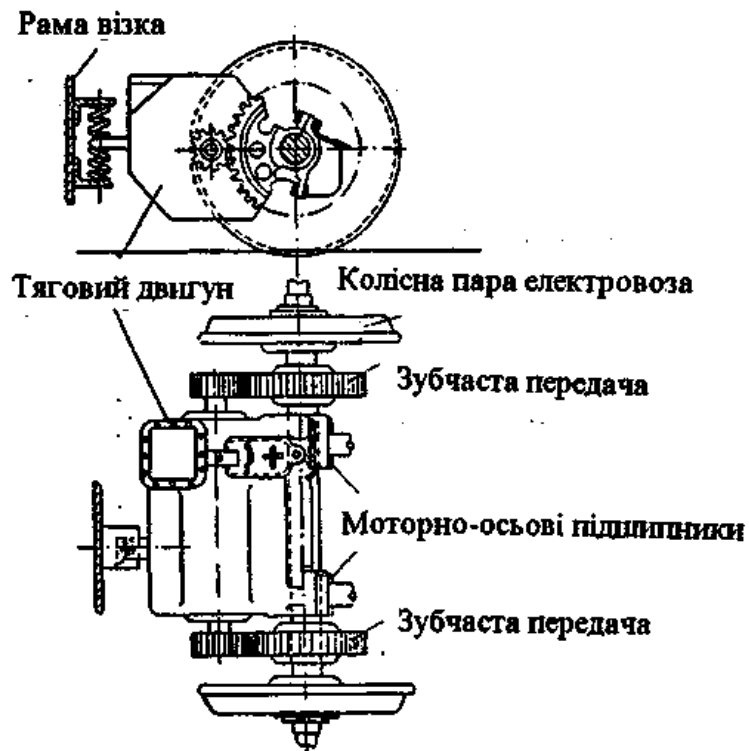


Рисунок 1.2 - Схема двосторонньої зубчастої передачі електровоза

Під час планового технічного обслуговування електровозів ПР-2 і ПР-1, тепловозів, електросекцій і дизель-поїздів українські майстри та інспектори оглядають колісні пари.

Огляди колісних пар проводяться після нещасних випадків, таких як зіткнення або сходження локомотива з рейок.

Періодичні огляди колісних пар проводяться на електровозах, тепловозах, електросекціях і дизель-поїздах при ремонті ПР-3, при установці роликів підшипників на колісні пари, при обкатці осей, з моменту останнього періодичного огляду і профілювання яких пройшло більше двох років, а також при обкатці і ремонті бандажів на обкатаних осях.

Повний огляд колісної осі проводиться при капітальному ремонті електровоза, тепловоза, електросекції або дизель-поїзда в заводських умовах, при заміні хоча б одного елемента колісної осі, при неясності

клейм або слідів попереднього повного огляду, при пошкодженні колісної осі внаслідок наїзду локомотива або аварії після сходу з рейок, при допущенні неметалевих включень у колісну вісь, а також при виявленні в ній нечистот. Це робиться після усунення будь-яких порізів або інших дефектів осі, які можуть бути присутніми.

Огляд або випробування колісних осей призначені для перевірки стану осі, зносу елементів і міцності їх з'єднань, дотримання встановлених допусків і зносів, а також для виявлення і, в разі необхідності, усунення дефектів осі. Під час огляду та випробувань повинні застосовуватися вимірювальні прилади та спеціальний інструмент.

Огляди колісних пар повинні проводитися тільки в місцях, дозволених Укрзалізницею, та особами, які мають право на виконання цих робіт.

Під час повного огляду моторно-колісної пари на ліву сторону осі наносять клеймо і ставлять штамп (рис. 1.3). Правою стороною осі вважається сторона з клеймом і маркуванням, що відносяться до виготовлення осі.

Умовний номер заводу або ремонтної майстерні, яка перевіряла колісну пару.

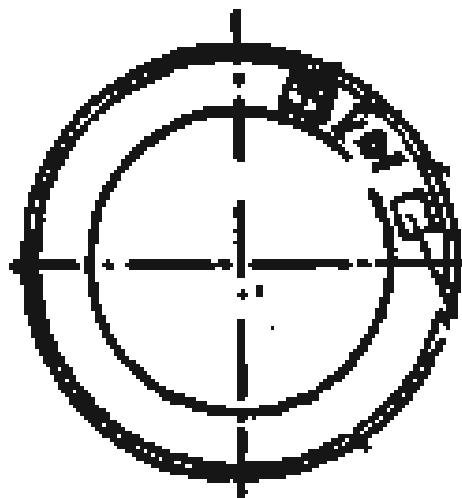


Рисунок 1.3 - Знаки і клейма на колісній парі локомотива про повне її обстеження

Результати перевірки всіх типів колісних пар фіксуються в спеціальному журналі встановленої форми та в технічному паспорті колісної пари.

Колісні пари на вагонах, вагонах і причіпних вагонах МВРУ мають два колеса, жорстко закріплені на одній осі.

Діаметр колеса - це діаметр кола на відстані 70 мм від внутрішнього краю обода колеса. Це коло називається коченням. Товщина обода безкамерного колеса вимірюється по колу кочення.

Огляди колісної пари (періодичні та повні) проводяться з метою перевірки її технічного стану та придатності до руху.

Кожна колісна пара під транспортним засобом обов'язково реєструється в спеціальному журналі, щоб можна було ідентифікувати належність колісної пари до конкретного транспортного засобу, його організацію, а також місце і час проведення перевірки.

Огляди колісних пар під вагонами проводяться на станціях під час прибуття поїздів, їх формування, розформування та перед відправленням.

Огляди колісних пар під рухомим складом проводяться з метою виявлення таких дефектів: тріщини, вибоїни (повзуни), зминання, вм'ятини, відколи, раковини, зазубрини, накати країв, подрізи, гострий гребінь накату, тріщини в маточинах, ознаки ослаблення або зміщення маточини на осі поперечні або поздовжні тріщини на осі, стирання в центрі осі.

Зовнішній огляд осей проводиться в пунктах підготовки вагонів до перевезень, організації, технічного обслуговування і заміни, а також у депо. Надійність затягування болтів кріплення кришок визначається простукуванням. Ослаблені болти підтягують, а пружинні шайби, що втратили пружність, замінюють на придатні [2].

## 1.2 Основні технології виплавки колісної сталі

Аналіз умов експлуатації залізничних коліс і факторів, що визначають їх надійність і довговічність, а отже, і безпеку залізничних перевезень, показав, що такі властивості, як ударна в'язкість, пластичність і поріг холодноламкості, залежать в основному від якості сталі (хімічного складу, газового складу, вмісту неметалевих включень, термічної обробки, розміру зерна і структурного стану).

Вуглецева сталь в основному використовується у виробництві суцільнокатаних залізничних коліс. В Україні ця колісна сталь виробляється згідно з ГОСТ 10791-89 [3].

Вуглець - найважливіший і найдоступніший елемент у сталі. Збільшення вмісту вуглецю в металі підвищує міцність, але знижує пластичність і погіршує стійкість до термічних пошкоджень.

Аналіз виробництва колісної сталі виявив три найбільш ефективні методи виробництва колісної сталі.

Перший метод - виплавка колісної сталі в плавильній печі. При виплавці сталі скраповим методом підготовка шихти (чавун і скрап) здійснюється для досягнення вмісту вуглецю в розплавленому стані 1,20-1,50 %.

В якості флюсів використовують металургійне негашене вапно (вапняк і повітряно-сухий боксит) і ставролітовий концентрат (0,8-1,0% від маси розплавленої сталі). Запропоновано використання ставролітового концентрату як розбавляючої добавки для підвищення окислювальної здатності шлаку, скорочення часу виплавки і підвищення ступеня рафінування металу. Ставролітовий концентрат є побічним продуктом збагачення поліметалевих руд. За хімічним складом ставроліт ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  46-50%,  $\text{SiO}_2$  36-38%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  13-15%) подібний до сирих бокситів. Витрата вапна (вапняку) встановлюється з розрахунку основності шлаку ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) при плавці не менше 1,8, тобто 4,5-5,0% від маси шихти.

Виплавка сталі скрап-процесом ускладнюється тим, що шихта, яка використовується для переробного чавуну, містить 0,040-0,060% сірки, а концентрація сірки в шихтовому розплаві досягає 0,06%.

Використання чавуну, десульфурованого магнієм у ковші, є перспективним варіантом для виробництва колісної сталі. У процесі плавки в піч подається максимальна кількість палива і вторинного повітря, необхідна за встановленим тепловим режимом: на ІНТЕРПАЙП НТЗ піч опалюється природним газом з науглецюванням мазуту (приблизно 30% теплового балансу) і перегрітою парою під тиском  $1 \cdot 10^6$ - $1,2 \cdot 10^6$  Па або стисненим повітрям під тиском  $6 \cdot 10^5$  Па розпилюється. З огляду на те, що сталь є когезійним матеріалом, при переведенні мартенівських печей на опалення природним газом існувало побоювання, що вміст водню в рідкій сталі збільшиться через вищий парціальний тиск водяної пари в атмосфері печі. Досвід виправдовує такі побоювання.

Це відбувається лише в тому випадку, коли піч топиться мазутом, розпилюється повітрям, а потім переходить на природний газ. Якщо мазут розпилюється водяною парою, вміст водяної пари в атмосфері набагато вищий, ніж при опаленні природним газом. Зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря вміст водяної пари в атмосфері топки зменшується у всіх режимах опалення. Тому використання повітря для розпилення мазуту замість пари, як відразу після плавки у ванні, так і протягом усього процесу плавки, допомагає виробляти сталь з меншим вмістом водню.

З цією ж метою використовується високоякісний брухт, а завантаження легкого брухту, в тому числі стружки і мішків, обмежується до 10%. Особлива увага приділяється максимальному видаленню шлаку. Швидкість вигорання вуглецю в процесі фінішної обробки плавки повинна бути менше 0,30% С/год.

У поточному виробництві цей показник становить 0,35% С/год, що досягається за рахунок руд, що вводяться в процес плавки.

Для розкислення шліфувальної сталі використовують доменний феромарганець, силікомарганець, 25% і 45% феросиліцію. Співробітники НМетАУ у співпраці з Нижньодніпровським трубопрокатним заводом "Інтерпайп" розробили технологію розкислення колісної сталі, яка передбачає два етапи нейтралізації шлаку в печі та ковші.

Ця технологія розкислення нейтралізує шлак шляхом додавання чорного алюмінію, нагрітого до 500-600°C (одночасно з введенням феромарганцю), з витратою 0,3-0,5 кг/т. З одного боку, розкислення шлаку алюмінієм призводить до зниження вмісту FeO на 3,4% і значно нейтралізує активність пічного шлаку по відношенню до кремнію і марганцю, що вводяться в метал. З іншого боку, утворення  $Al_2O_3$  в шлаку є поверхнево активним і сприяє спіненню шлаку: двоступенева нейтралізація шлаку знизилася вміст водню в шлаку на 7,5  $cm^3/100$  г і в металі на 1  $cm^3/100$  г (або 12% від початкового). Брак коліс через якість металу зменшився на 0,23%. Крім того, загальна витрата феросплавів, необхідних для розкислення, скоротилася на 7 кг/т (за рахунок скорочення витрати феросилікомарганцю на 25%).

Феромарганець (2,0-3,2 кг/т) вводять в піч, коли вміст вуглецю в металі знижується до 0,58-0,60% і температура досягає 1610-1620°C. Час витримки металу в печі після введення феромарганцю становить 3-7 хвилин. Загальний час розкислення в печі не повинен перевищувати 15 хвилин.

Для економії марганцевмісних сплавів на підприємстві була розроблена технологія введення цих сплавів в ківш. Застосування цієї технології стало можливим завдяки впровадженню способу продувки рідкої сталі аргоном через рідкокристалізаційний ківш.

НТМК виплавляє колісну і стрічкову сталь з використанням скрап-руди у 280- і 150-тонних мартенівських печах. Рідкий чавун використовується в кількостях, що визначаються плановою витратою чавуну. Чавун має наступний склад: Si 0,3-0,7, S 0,030, P 0,23 (бажано з



вмістом марганцю не менше 0,40). Залізорудний агломерат додається виходячи з необхідної основності шлаку і необхідності забезпечення вмісту вуглецю при плавці. Шлак вивантажується з печі після заливки чавуну з одночасною продувкою ванни киснем або газокисневою сумішшю. Продування відбувається протягом усього процесу плавки. Вміст вуглецю на 0,5% перевищує середнє значення для готової сталі в 150-тонній печі і на 0,4% - в 280-тонній печі. Рівень основності шлаку підтримується в діапазоні 1,8-2,0.

Під час кипіння руди швидкість вигорання вуглецю становить 0,30% С/год у 150-тонній печі та 0,25% С/год у 280-тонній печі. Перед розкисленням допускається вміст сірки до 0,030%, фосфору до 0,012%, основність 2,4-3,8 і вміст FeO до 12,0.

Попереднє окислення металу здійснюється в печі, що містить високовуглецевий феромарганець і 45% феросиліцію. Для забезпечення якості, необхідної для коліс і ободів, остаточне розкислення металу в ковші (після заповнення 1/3 ковша) проводиться з використанням добавки силікату кальцію (СК-15) і 30% феротитану, який додається після додавання феросиліцію. При виплавці колісної сталі використовують розкислювачі з розрахунку 0,30-0,33 кг кальцію і 0,20-0,25 кг титану на тону сталі.

Основним напрямком виробництва сталі в Україні та за кордоном є скорочення виробництва в мартенівських печах і збільшення виробництва в кисневих печах, і на "Азовсталі" є нещодавно введена в експлуатацію доменна піч з верхнім дуттям ємністю 350 тонн, яка обробляється рідким синтетичним шлаком, продувається різними розкислювачами і вакуумується для отримання киснево-конвертованої сталі за межами печі. Для рафінування вона обладнана системою рафінування в ковші.

Другий спосіб - виробництво колісної сталі в киснево-конвертерній печі. На Дніпровському металургійному комбінаті введено в експлуатацію конвертерний цех з 250-тонною конвертерною піччю.

На відміну від традиційних методів, де продувка чавуну здійснюється подачею кисню через лопатку, введену в шихту, в цьому конвертері можна продувати метал зверху і знизу через подину захищеним струменем кисню. У конвертерному цеху НТМК для виробництва колісної сталі використовувався 130-тонний конвертер з основним киснем. Здійснено виплавку сталі; оскільки в конвертері НТМК використовується природний легований ванадієвий чавун, хімічний склад сталі для коліс кисневого конвертера характеризується наявністю до 0,05% ванадію. Сталь оброблялася у двофазному конвертерному процесі. У першому конвертері чавун виплавлявся в режимі, при якому окислення ванадію чавуну було найбільш просунутим, з приблизним хімічним складом (мас. %):  $V_2O_3$  9,4-10,06,  $SiO_2$  20,5-22,0,  $FeO$  -35,5,  $Fe_2O_3$  8,5-10,0,  $Fe(met)$  3-5,  $CaO$  0,8-1,2,  $MgO$  -. 20,  $MnO$  4,8-6,8,  $Al_2O_3$  2,3-2,5,  $Cr_2O_3$  2,2-7,0,  $P_2O_5$  0,10-0,15, S 0,02-0,03. У другому конвертері вуглецеві напівфабрикати містять, %, C 3, P 0,05, S 0,02-0,03: C 3, P 0,05, S 0,028, V 0,04 і Містить незначні кількості титану та кремнію. Загальна тривалість плавки в другому конвертері становила 35 хвилин, у тому числі 15 хвилин фактичної продувки. Хімічний склад отриманого металу відповідав вимогам ГОСТ 10791-64.

Зразки, відібрані з готового обода колеса, мали такі ж механічні властивості і ударну в'язкість, як і аналогічні колеса, виготовлені з мартенівської пічної сталі в діапазоні температур від +20 до -60°C. Таким чином, при виробництві ванадієвих колісних сталей з природно легованого чавуну НТМК потрібно менше споживати дефіцитного і дорогого феруму [2].

Третій спосіб - виробництво колісної сталі в електричній печі. Технологія виробництва колісної сталі була розроблена на Дніпропетровському (ДСС) і Череповецькому металургійних комбінатах в електропечах ємністю 30 тонн (ДСС) і 100 тонн (ЧерМК). Шихта печі ДСП-30 складалася з вуглецевого сталевих брухту (99%) і коксу (1%).

Після повного розплавлення шихти завантажували руду (0,42 кг/т) до тих пір, поки шлак не спінювався.

Потім шлак відкочували і готували новий шлак з вапна (0,4 т), плавикового шпату (0,01 т) і вогнетривкої глини (0,020 т). Ванна була окислена 2,15 кг/т руди і 5-7 нм<sup>3</sup>/хв газоподібного кисню.

За період окислення було окислено 0,32-0,51%. Швидкість окислення вуглецю коливалася в межах 0,31-0,51%/год. В кінці періоду окислення частина окисленого шлаку була видалена, а шлак, що залишився, був розкислений коксом і порошком феросиліцію. Загальний час окислення в середньому становив 50 хв. Коли температура досягала 1610-1620°C, метал випускали з печі. Остаточне розкислення сталі проводилося в ковші з алюмінієвим або кальцієвим силікатом.

Під час плавки піч працювала в наступному електричному режимі: вторинна напруга. Максимальний струм печі становив 34 600 А. Діаметр електродів - 555 мм. Піч була обладнана статором для магнітного перемішування металу і киснево-водяним охолодженням.

Конфігурація шихти визначалася залежно від вмісту вуглецю після плавки. Вага шихти для плавки становила від 108 до 115 тонн. Чавун 13,8-17,4, важкий брукт 32,4-39,1, копровий брукт 13,1-21,3 і листопрокатний брукт 18,5-44,4. Всього було проведено 13 плавок. Дослідно-промислові плавки в основному проводилися з використанням п'яти різних способів плавки з різними шлаковими режимами, типами використовуваних розкислювачів і позапічних обробок. Як відомо з досвіду виплавки сталі в дугових печах великої потужності, найбільш прогресивним є одношлаковий процес, який характеризується плавкою під одним шлаком протягом періоду окислення. З огляду на переваги та майбутній потенціал одношлакового процесу, 10 з 13 плавок були проведені в режимі одношлакового процесу, а 2 з 13 - в режимі двошлакового процесу [5].

Перед вакуумуванням пічний шлак обробляли магнезитом, доломітом і шунгітом. Алюміній вводили в метал на стрижнях. Для

розливання вакуумованого металу використовували сталевий розливний ківш діаметром 40 мм із шиберною засувкою. Інші розплави вироблялися в ковші з запірним пристроєм зі сталевим виливницею діаметром 60 мм. Метал розливали сифоном у колісні виливниці з масою вилівка 4,2 тонни. Температура сталі в ковші перед розливанням становила 1610-1630°C без вакууму і 1620-1640°C з вакуумом. Зразки металу для визначення хімічного складу і вмісту газів відбирали перед випуском сталі з печі і в процесі розливання після заповнення кожного піддону. Зміна вмісту водню показує, що середній вміст водню на виході з печі вищий у разі виплавки сталі двошлаковим і одношлаковим способами та розкисненням силікатом кальцію, що відповідає  $6,2 \cdot 10^{-4}\%$  і  $5,4 \cdot 10^{-4}\%$  відповідно. Найнижчий вміст водню спостерігається в сталі, розкисненій алюмінієм, в середньому  $5,5 \cdot 10^{-4}$ .

У кожному процесі виплавки і розливання, незважаючи на те, що вміст азоту в розплавленому металі, як правило, істотно змінюється від плавки до плавки, вміст азоту в розплавленому металі істотно змінюється від плавки до плавки. У колісній сталі вміст азоту при виплавці в електродуговій печі значно нижчий, ніж при виплавці в мартенівській печі.

В середньому вміст азоту в металі становить 0,0103. З іншого боку, при виплавці тієї ж сталі в мартенівській печі вміст азоту в досліджуваному металі в середньому становить 0,0058 (з варіацією 0,0049-0,0067).

Було досліджено зміну вмісту кисню під час розливання і встановлено, що найнижчий вміст кисню (0,0067%) перед випуском сталі з печі був виявлений у випадку виплавки сталі за двошлаковим методом. Це пояснюється тим, що при цьому способі виплавки метал дифузійно розкислюється порошкоподібним розкислювачем феросиліцієм протягом 40-55 хвилин. При цьому найнижча концентрація кисню в металі при розливанні (до 0,003%) була досягнута при розкисненні сталі алюмінієм з вакуумуванням, тоді як одношлакова виплавка сталі без вакуумування не забезпечувала низької концентрації кисню при розливанні. Однак у сталі,

розкисленій алюмінієм, концентрація кисню при розливанні була нижчою, ніж у сталі, розкисленій силікатом кальцію. Результати аналізу одношлакових сталей показують, що вакуумування металу в ковші знижує загальний вміст кисню в середньому на 0,0007% для розкислених алюмінієм сталей і на 0,0019% для розкислених силікатом кальцію сталей порівняно зі сталями без вакуумування.

Незважаючи на вищу основність, вміст сірки в шлаку одношлакового процесу нижчий, ніж у шлаку двошлакового процесу. У разі двошлакового виробництва сталі вміст сірки в металі перед виходом з печі в середньому становить 0,017%, тоді як в одношлаковому виробництві - 0,023%. У першому випадку коефіцієнт розподілу сірки між шлаком і металом в середньому становить 7,74 (діапазон 6,24-9,00), а основність - 3,36, тоді як у другому випадку -2,5 (діапазон 1,26-5,69), а основність вища (3,71) відповідно. Така ситуація пояснюється тим, що зі збільшенням вмісту оксиду заліза в шлаку зменшується його сіркопоглинальна здатність (обробка шлаку на стадії відновлення значно знижує вміст сірки в металі).

У процесі розливання в ковші концентрація сірки в пробах металу двошлакового процесу коливалася в межах 0,006-0,012%, тоді як у металі одношлакового процесу - 0,012-0,032%. Ступінь десульфурації металу під час виплавки коливався в межах 43-53% у двошлаковому процесі і 15% в одношлаковому процесі. Таким чином, з усіх випробуваних способів виплавки найбільш чисту сталь за вмістом газів і сірки отримали наступні технологічні варіанти

а) Одношлакова плавка з розкисленням алюмінію і подальшим вакуумуванням. Якість цієї сталі характеризується найнижчими концентраціями кисню (в середньому 0,0038%) та азоту (0,0098%) і відносно низьким вмістом водню (3,8-4,1%);

б) виплавка одношлаковим способом з розкисленням металу силікатом кальцію та вакуумуванням. Метал цього варіанту містить

невелику кількість кисню (0,0040%) та азоту (0,0101%) і має відносно низьку концентрацію водню (4,0-5,2);

в) 2-шлакова плавка з ковшем розкисленого силікату кальцію; сталь містить мінімум 0,008% сірки, низький вміст азоту і дещо вищі концентрації водню (5,0-5,3) і кисню (0,0046).

Сталі, виплавлені одношлаковим способом з використанням ковшового розкисленого силікату кальцію, містять кисень (0,0058%) і водень (6,0-6,5), тоді як сталі, виплавлені в одношлаковому процесі з використанням діоксиду алюмінію, мають найвищий вміст азоту (0,0112%) і зростаючий вміст кисню (0,0045%).

У цій статті проаналізовано технології виплавки вуглецевих сталей для колісного сортаменту у мартенівській печі, киснево-конвертерній та електрометалургійній виплавці.

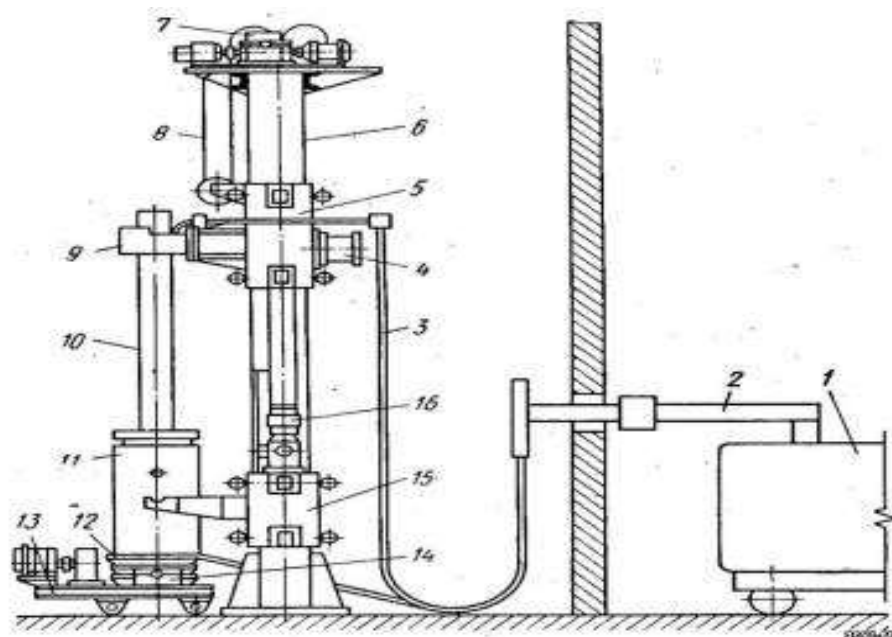
Виробництво коліс із сталі, виплавленої без вакуумування, не тільки значно погіршує якість суцільнокатаних коліс, але й використовується у залізничному транспорті спеціального призначення (наприклад, для перевезення сирого та відпрацьованого ядерного палива, оборонних об'єктів). Виробництво шліфованої сталі в киснево-конвертерній печі є більш економічним, ніж у мартенівській печі, але є й недоліки. Основним недоліком є підвищений вміст кисню, що призводить до утворення флоксу [7].

Тому найбільш економічним і ефективним способом виробництва колісної сталі є виплавка сталі з використанням електродугової печі як основного процесу з різними варіантами виплавки із застосуванням методу позапічного вакуумного рафінування, що значно підвищує якість колісної сталі.

## 2 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУЧАСНИХ МЕТОДІВ СПЕЦЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ

### 2.1 Установа ЕШП типу ОКБ-1065

Однофазний агрегат ОКБ-1065, призначений для переплавлення електродів у злитки квадратного перерізу масою 3500 кг, показаний на рисунку 2.1. Електрод, що переплавляється, закріплений в електродотримачі на каретці, переміщується по вертикальній стійці за допомогою троса від електромеханічного приводу. Привід переміщення електрода складається з електродвигуна, диференціального редуктора і двох комплектів відкритих циліндричних шестерень. Електрод утримується в електродотримачі зусиллям пружини і звільняється пневматичним циліндром. Злиток розплавляється в кристалізаторі, а мідний шинопровід встановлюється на піддоні.



1 – електрод, що витрачається; 2 – електродотримач; 3 – каретка; 4 – стойка; 5 – привод переміщення електродотримача; 6 – кристалізатор; 7 – струмопідвід до піддону; 8 – водоохолоджуючий кабель; 9 – каретка для підйому зливка

Рисунок 2.1 – Установа ЕШП типу ОКБ-1065

Струм до електродів подається гнучкими кабелями з водяним охолодженням. Кристалізатор піднімається спеціальними візками з незалежним рейковим приводом по мірі осадження злитків.

Недоліком однофазного обладнання є високий реактивний опір нижнього кінця струмопідводів через велику довжину струмоведучої частини витратного електрода і наявність гнучких дротяних петель. Трифазні системи мають низький реактивний опір, але живлення трьох кристалізаторів від трифазного трансформатора порушує стабільність режиму на кожному електроді. Трифазні установки з трьома електродами в одному кристалізаторі підходять для виплавки великих злитків.

Для зменшення електричних втрат цікаво використовувати біфілярне живлення. У цьому випадку в одному кристалізаторі одночасно плавляться два електроди, які подаються в кристалізатор одним електродотримачем з двома послідовно з'єднаними і електрично ізольованими струмопідводами. Біфілярний струмопідвід забезпечує близьке і паралельне розташування струмопідводів у всіх зонах, що містять необхідні електроди, і знижує індуктивність короткого замикання.

Вага зливків, що виплавляються в електросталеплавильних установках, може досягати десятків тонн. Цей спосіб плавки є найбільш економічним з усіх способів плавки і стає все більш популярним для виробництва високоякісних сталей і сплавів [8].

## 2.2 Основні принципи технології ЕШП

В ЕШП тепло генерується шляхом пропускання струму через шлак. Щільність струму в цьому процесі зазвичай становить 0,1-0,5 А/мм<sup>2</sup>. Чим нижча густина струму, тим складніше індукувати шлак на початку процесу, але процес дуже стабільний у широкому діапазоні струмів і напруг, коли густина струму низька, що полегшує підтримання стабільності процесу. Шлак має вищу міцність розплаву, ніж метал



витратного електрода, що забезпечує краще очищення від газів і неметалевих включень, достатній електричний опір (при високій електропровідності виділяється мало тепла), необхідну плинність рідини (інакше погіршується теплопередача від шару шлаку до кристалізатора і якість злитка ) та інші характеристики повинні бути присутніми.

Наприклад, марка С-1 складається з 17% нітрату калію, 16,5% алюмінієво-магнієвого порошку і 66,5% наповнювача; витрата флюсу С-1 становить близько 0,5 кг на тону металу. Для запуску процесу використовувався шлак, який постачався Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона.

Після стабілізації процесу в кристалізатор подається робочий флюс; основою більшості робочих флюсів, що використовуються в електродуговому зварюванні, є фторид кальцію. Найпоширенішим робочим флюсом є АНФ-6, який містить 25-30%  $Al_2O_3$ , 57-65%  $CaF_2$  і 4-5%  $CaO$ . Температура плавлення цього флюсу становить 1320-1340°C, а його витрата - 3-4% від маси злитка. Шлак десульфує метали і використовується для сталей і сплавів, що містять бор і титан. Флюс АНФ-111, що містить 95%  $CaF_2$  і 5%  $CaO$  з температурою плавлення ~1400°C, можна використовувати для переплавлення сталей, що містять бор і титан.

Флюс слід зберігати в сухому приміщенні. Перед використанням його слід висушити при 300 °С для видалення вологи. Флюс виплавляють у футерованих вуглецем однофазних дугових електропечах або тиглях з водяним охолодженням. Розплавлений флюс подрібнюють, розтирають і пропускають через сито 2 x 2 мм.

При ЕШП рідкий метал витраченого електрода переноситься у вигляді крапель через шлакову ванну в кристалізатор. Це збільшує площу контакту металу зі шлаком і забезпечує більш повний процес рафінування, ніж у звичайних електродугових печах. Важливим аспектом електродугової печі в цьому відношенні є забезпечення оптимальної частоти відриву і оптимального розміру крапель від розплавлених

електродів. Частота відриву крапель від краю електрода, їх середній розмір і довжина шляху через шлак залежать від параметрів плавки (струму і напруги, складу розплавленого металу тощо). У кожному конкретному випадку технологія плавки підбирається таким чином, щоб забезпечити отримання металу високої якості при максимальній продуктивності електросталеплавильного агрегату.

Перед початком плавки кристалізатор ретельно оглядають і, якщо він знаходиться в задовільному стані, особливо якщо немає витоків, дно кристалізатора очищають і поміщають туди приманки (пластини, виготовлені з того ж металу, що і метал, який плавиться). Приманка захищає дно кристалізатора в перші моменти розчинення. На приманку заливають добре перемішаний струмопровідний флюс. Це необхідно для отримання рідкого шлаку на початку процесу.

Після заливки робочого флюсу подається вода для охолодження кристалізатора і піддону і вмикається струм. Максимальна сила струму, яка гарантує стабільний процес ЕШП, залежить від діаметра витратного електрода.

Таблиця 2.1 – Сила току пари використанні електродів різних розмірів

Діаметр електрода, мм	80-100	150-160	170-180
Сила току, А	3600-4000	4600-5500	6500-7500

Протягом 10-15 хвилин після ввімкнення печі в кристалізаторі утворюється рідка шлакова ванна висотою 90-140 мм.

Режим електроплавки має вирішальний вплив на якість злитка і його поверхню. Зі збільшенням споживаної потужності збільшується глибина залягання рідкого металу в кристалізаторі та час затвердіння заготовки. Це призводить до появи в металі неметалевих включень. Наприклад, на "Дніпроспецсталі" при зниженні струму, що подається в кристалізатор

діаметром 300 мм, з 9 кА до 6 кА забрудненість сталі неметалевими включеннями знизилася на 25-35%.

Однак зниження температури металу при низькій споживаній потужності призводить до збільшення його в'язкості і проникнення частинок шлаку в метал, що викликає утворення шлакових кірок. Поверхня заготовки швидко псується.

При низькій висоті рівня шлаку і великій потужності відбувається закипання шлакової ванни і значне коливання струму. Для усунення цього явища необхідно зменшити силу струму; продуктивність електрофільтру залежить від діаметра кристалізатора, обраного електричного режиму, марки сталі тощо. Наприклад, при діаметрі кристалізатора 200 мм продуктивність установки становить 100-150 кг/год, а споживання електроенергії - 1300-1600 кВт-год на тонну металу.

Поліпшення техніко-економічних показників роботи електросталеплавильних установок досягається за рахунок скорочення простоїв між плавками, підвищення ступеня механізації допоміжних операцій і збільшення виходу брухту.

Підвищення виходу шихти в електросталеплавильних агрегатах може бути досягнуто за рахунок використання рідкого шлаку; впорскування рідкого шлаку (сифоном) знизу в кристалізатор електросталеплавильного агрегату було вперше застосовано в трифазному обладнанні "Електросталі",

Цей апарат має три електроди діаметром 170 мм. Процес електросталеплавильного виробництва за допомогою сифонування рідкого шлаку є економічно вигідним.

Удосконалення ємності і швидкості подачі шлакової ванни або системи управління швидкістю плавлення маси електродів також підвищує продуктивність установки.

Покращення техніко-економічних показників електросталеплавильних заводів також можна досягти за рахунок

повторного використання шлаку, коли шлак не окислюється і не збагачується сіркою.

### 2.3 Установка печі ВДП

Вакуумно-дугова плавка широко використовується в розвинених країнах завдяки можливості досягнення високої чистоти металу при відносно простих операціях: тільки в 1980-х роках працювало близько 100 вакуумно-дугових плавильних установок, які щорічно виробляли десятки тисяч тонн спеціальних сталей і численні марки сплавів.

ВДП є важливою ланкою в технологічному ланцюжку виробництва високоякісних жароміцних деформаційних сплавів і є завершальною стадією у формуванні структури і складу сплаву. Плавка відбувається у водоохолоджуваному кристалізаторі методом вакуумно-дугового переплаву витратних електродів, де формуються злитки ВДП забезпечують: високий ступінь термічної стабільності; високий ступінь термічної стабільності; високий ступінь термічної стабільності; високий ступінь термічної стабільності; високий ступінь термічної стабільності; високий ступінь термічної стабільності; високий ступінь термічної стабільності; високий ступінь термічної стабільності:

- Видалення летких домішок, розчиненого водню, газоподібного азоту, неметалевих включень та легування сплавів;

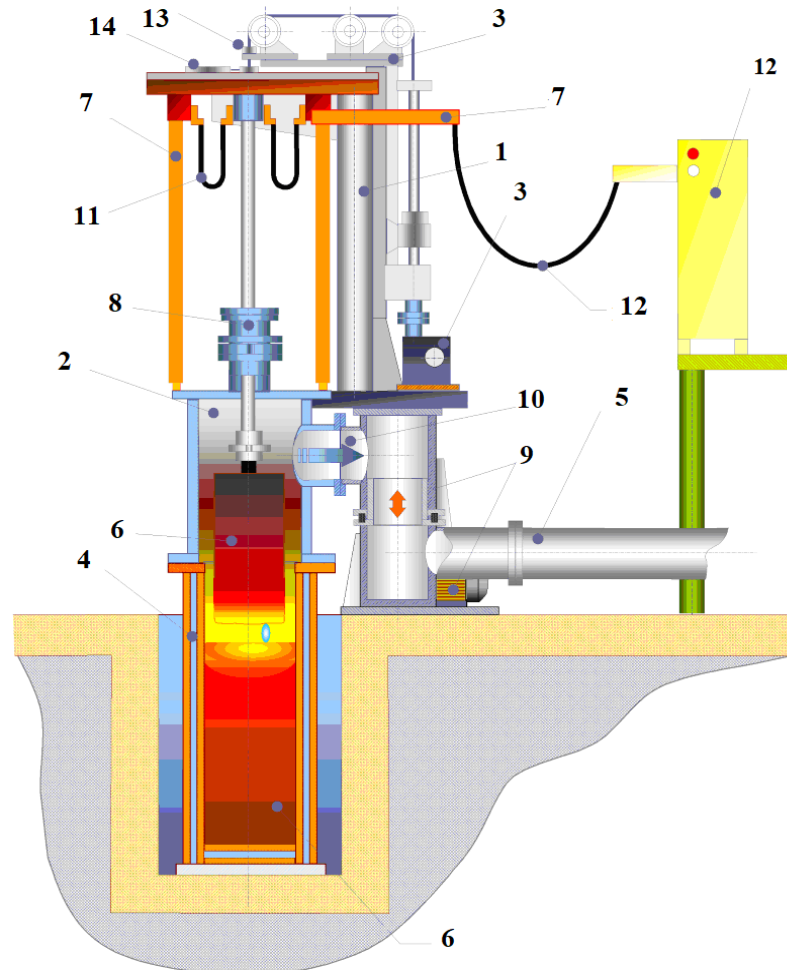
- Створення можливості контролювати процес кристалізації, який визначає важливі металургійні властивості, такі як міцність, пластичність і жаростійкість;

- максимальний вихід придатної продукції [1].

### 2.4 Основні принципи технології ВДП

При ВДП, так само як і при ЕШП, використовують переплавлені електроди зі сталі тієї ж марки, злиток якої необхідно отримати. Метал для

електродів виплавляють в дугових електропечах, іноді в мартенівських печах з наступною обробкою його синтетичним шлаком, а в деяких випадках в інших агрегатах для переплавки (ЕШП, вакуумних індукційних печах або в тих же установках ВДП). Виплавка електродів у відкритих печах більш економічно виправдана.



1 - несуча металоконструкція; 2 - вакуумна камера; 3 - механізм переміщення електродотримача; 4 - водоохолоджувальний кристалізатор; 5 - вакуумна система; 6 - злиток; струмонесучий шинопакет; 8 - вузол утілення штока електродотримача; 9 - вузли механізмів підйому і одвороту камери електропечі; 10 - вакуум провід; 11 - гнучкі водоохолоджувальні кабелі; 12 - джерело живлення електропечі; 13 - тензодатчик; 14 - механізм гойдання штоку

Рисунок 2.3 – Схема печі ВДП

При використанні кованих або катаних електродів заготовки для них обробляються на токарному верстаті. Основним недоліком цієї технології є велика кількість відходів (50%). Використання литих електродів є більш економічно вигідним. Однак литі електроди мають шорстку поверхню з глибокою усадочною пористістю, яка виникає під час кристалізації в установках для лиття у виливниці. Більш якісні електроди виходять при литті на машині безперервного лиття заготовок.

Слід мати на увазі, що вартість електродів є однією з найвищих статей витрат для швидкоріжучих сталей (до 85%). Тому зниження вартості електрода дозволить знизити загальну вартість процесу ВДП.

Діаметр електрода повинен бути на 50-140 мм меншим за діаметр кристалізатора. Якщо зазор між електродом і поверхнею кристалізатора малий, тиск над ванною буде вищим, ніж у робочій камері. Це призводить до виникнення паразитних дуг між електродом і кристалізатором. Якщо зазор великий, електрод не захищає ванну, і тепло випромінюється вгору.

Установки ВДП працюють на постійному струмі. Витратний електрод є катодом, а рідкий метал у кристалізаторі - анодом. У вакуумі дугу можна зробити довшою без значного зменшення струму і збільшення напруги. У короткій дузі краплі металу, що падають з кінця електрода, закривають дуговий проміжок, метал розсіюється і ванна охолоджується, оскільки струм проходить через краплі, а не через стовп розрядного газу.

Температура дуги не однакова по всій її довжині і коливається між 2000 і 1200°C. Незважаючи на високі температури, краплі, що падають в стовп дуги, не встигають значно нагрітися, оскільки проходять через дуговий проміжок за 0,05-0,1 секунди. Тому в разі ВДП температура рідкої ванни зазвичай трохи вища за температуру плавлення металу (60-100°C).

Дуга запалюється при зниженій силі струму, а після утворення кишень рідкого металу піч переходить на робочу силу струму. Оскільки метал інтенсивно охолоджується в кристалізаторі з водяним

охолодженням, протягом усього процесу в злитку залишається тільки басейн рідкого металу [2].

Для того, щоб зменшити відходи металу з головки злитка через наявність усадки, усадку видаляють в кінці плавки. У цей момент швидкість кристалізації металу трохи нижча за швидкість плавлення електрода, тому усадочні гнізда поступово заповнюються металом.

Після повного застигання зливка вакуум в печі скидається, кристалізатор і злиток від'єднуються, а піч очищається; якщо використовуються два кристалізатори, в піч встановлюється другий кристалізатор, підготовлений заздалегідь, і плавка починається заново. Для печі, обладнаної кристалізатором діаметром 320 мм, приблизний час, необхідний для кожної операції, становить: підготовка печі до плавки 20-30 хвилин; зарядка і фіксація електродів для зварювання поза піччю 25-15 хвилин; перекачування 35 хвилин; плавка 4 год 30 хв - 5 год 30 хв; видалення усадочної раковини 40 хвилин. Максимальна річна продуктивність печі - 895 тонн [9].

Можливість розплавлення стінок кристалізатора системи ВДП практично виключена, якщо підтримувати стабільний електричний режим. Необхідно стежити за тим, щоб довжина дуги була меншою, ніж відстань від поверхні електрода до стінки кристалізатора. Найефективнішим способом запобігання вибухам під час плавки в кристалізаторах є оснащення їх потужною вакуумною системою, здатною підтримувати низький тиск всередині печі навіть при великих об'ємах води. Під час нормальної роботи тиск у печі повинен підтримуватися на рівні  $<13$  Па ( $<0,1$  мм рт. ст.).

Під час плавки на стінках кристалізатора утворюється корона з крапель сконденсованого металу і парів домішок. Корона заповнена рідким металом і не плавиться повністю. На поверхні злитка утворюється шорстка кірка, яку доводиться видаляти токарним верстатом на глибину 5-10 мм.

Збільшення довжини дуги і сили струму дозволить швидше розплавити корону і поліпшити поверхню злитка. Довжина дуги 25-30 мм вважається оптимальною для великих кристалізаторів. Тому для пілотної плавки були використані електросталеплавильні агрегати ОКБ-1065 та ВДП.



### 3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

Було досліджено вплив на властивості колісної пари при ЕШП ступеня десульфурації металу, зміни концентрації домішок кольорових металів і кількості і складу неметалевих включень.

Електрошлаковому і вакуумно-дугового переплаву піддавалися електроди, що витрачаються, виготовлені з електропічного і мартенівського металу (рис. 3.1).

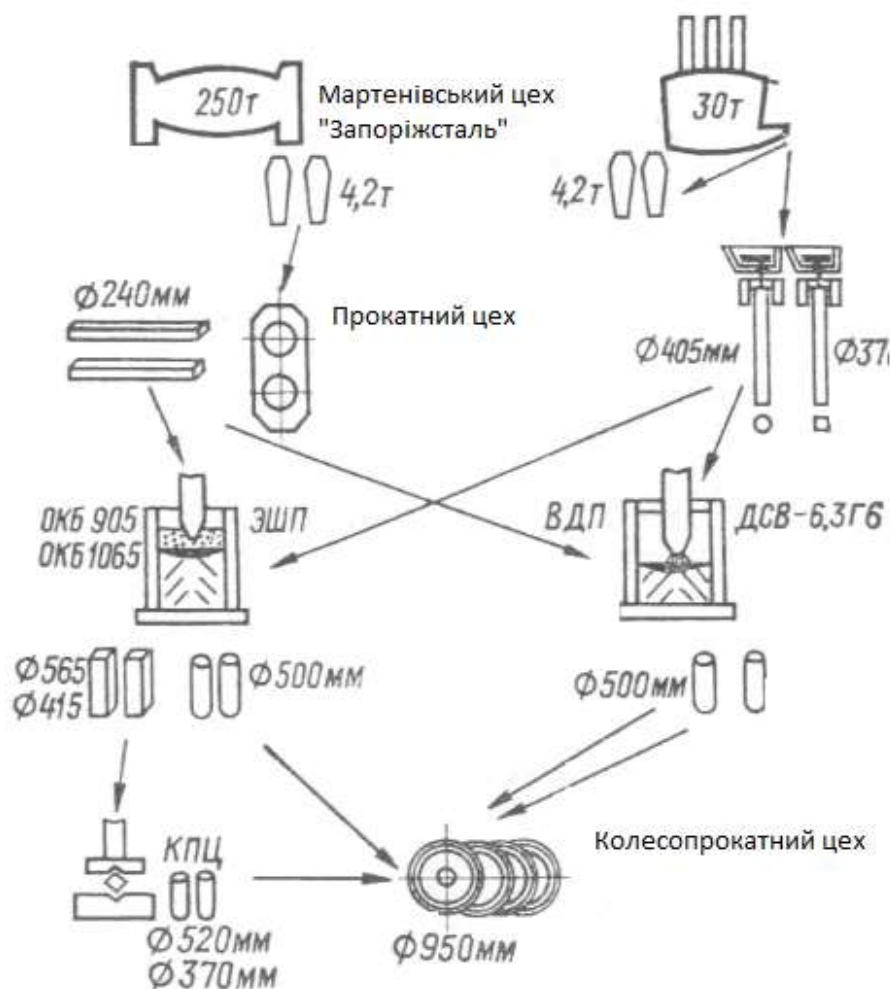


Рисунок 3.1 - Технологічна схема

Витратні електроди використовуються в електроерозійних і електроерозійних машинах і виготовляються литтям, прокаткою або куванням у спеціальних формах. Однак одним з найперспективніших способів виробництва витратних електродів є лиття на МБЛЗ або ДСП. Це

дозволяє значно зменшити витрати металу. У наших експериментах ми використовували витратні електроди, виготовлені з колісної сталі, виплавленої в 30-тонній печі.

На МБЛЗ метал розливався в два потоки: один потік - кристалізатор перерізом 370x370 мм для ЕШП, другий потік - кристалізатор діаметром 405 мм для ДСП.

Електроди для ВДП виготовлялися з мартенівського пічного металу шляхом кування зливків діаметром 405 мм, а електроди для ЕШП виготовлялися з мартенівського пічного металу шляхом прокатки в перерізі 240 x 240 мм.

Електрошлаковий переплав мартенівської сталі (М) здійснювався на установці ОКБ-905 (2 плавки), а електродуговий переплав (ЕП) - на установці ОКБ-1065 (3 плавки). В обох випадках використовували стандартний флюс АНФ-6 зі складом  $\text{CaF}_2$  65,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  30,  $\text{CaO}$  35,  $\text{SiO}_2$  0,40,  $\text{MnO}$  0,64 і  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  0,46.

Переплав проводили за групою 1, на основі існуючих технологій переплаву вуглецевих сталей [1].

Електрошлаковий переплав спочатку проводився в ОКБ-905 і ОКБ-1065. Для того, щоб виключити ущільнення квадратних зливків ЕШП перерізом 565x565 мм і 415x415 мм в ковальсько-пресовому цеху в круглій перерізі діаметром 520 мм і 380 мм (вимога технології виготовлення коліс), була досліджена можливість виробництва зливків ЕШП з круглим перерізом. Для цього використовувався кристалізатор ВДП діаметром 500 мм; електроерозійна обробка проводилася на установці ОКБ-1056 зі змінною рідинною ванною. Технічних відхилень при перепаві не виникло, але відсутність конуса в кристалізаторі викликала ряд труднощів при витяганні зливків з кристалізатора. У таблиці 3.1 наведено технічні параметри розплавів.

Вакуумно-дуговий переплав колісного металу електродуговим способом і плавка у мартенівській печі проводилася в кристалізаторі

діаметром 500 мм на установках ПСВ-6,3. Робочий тиск у плавильному просторі не перевищував  $1,33 \cdot 10^3$  А, а сила струму становила 9,5 кА. Для зниження вмісту оксиду марганцю в піч подавали аргон для видалення усадочних раковин. Технічні параметри розплаву наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Деякі характеристики виплавки мартенівським та електродуговим методом

Плавка	Метал	Установка	Маса злитку, т	Діаметр кристалізатору, мм	Витрати флюсу, кг/т	Швидкість наплавлення, кг/хв	Витрати інертного газу, м <sup>3</sup> /т	Витрати електроенергії, кВт·год/т
1ш	ОД	ОКБ-1065	4,160	565X565	45,5	8,65	-	1463
2ш	ОД	ОКБ-1065	3,600	565X565	55,5	8,67	8,67	1471
3ш	ОД	ОКБ-1065	4,060	Ф500	41,0	7,8	-	1522
4ш	М	ОКБ-905	2,350	415X415	36,0	6,65	6,65	1710
5ш	М	ОКБ-905	3,300	415X415	37,0	6,70	6,72	1573

Головна частина злитків ЕШП та ВДП, витягнутих з кристалізаторів, мала температуру до 800 ° С. Для запобігання утворенню тріщин злитки поміщалися в футеровані неопалювані колодязі, де вони повільно охолоджувалися до 150-200 ° С.

Злитки ЕШП 565 x 565 мм і 415 x 415 мм перековували у ковальсько-пресовому цеху на круглі діаметром 520 і 380 мм.

### 3.1 Якість металу ЕШП

При переплавці мартенівської колісної сталі та електродів з використанням флюсу АНФ-6 і 6,6-8,6 м<sup>3</sup>/т аргону марганець і вуглець кремнію були майже повністю видалені. У той же час, коли сталь переплавляли без захисної атмосфери (розплави 1 і 2), вміст марганцю і вуглецю кремнію становив 8% і 16%.

Під час ДСП відбувалася інтенсивна десульфатація металу, в результаті чого вміст сірки в злитку знижувався порівняно з вмістом у витратних електродах (плавки 1 і 3). Згідно з цим дослідженням, механізм

десульфурації полягає в наступному. Коли частина електрода потрапляє в зону термічного впливу під час фази попереднього плавлення, сульфідні включення дисоціюють. Під дією градієнтів температури і концентрації в цій зоні сірка дифундує з електроліту, що витрачається, в плівку рідкого металу. В результаті перерозподілу вміст сірки в гарячій зоні перерозподіляється відповідно до концентрації в рідкому металі. Видалення сірки з крапель електродного металу, що потрапляють в міжелектродну зону, подібне до спостережень за емульгованим металом під час позапічної обробки сталі синтетичним шлаком. Вміст сірки в обробленому шлаку суттєво не змінювався, а в деяких випадках зменшувався за рахунок окислення на поверхні шлакової ванни.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад, % колісної сталі мартенівської та електродугової виплавки в процесі ЕШП

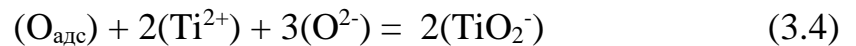
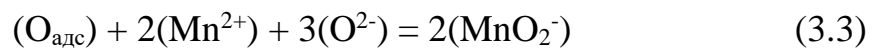
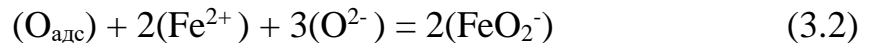
Плавка	Метал	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	ОД	0,55	0,73	0,33	0,011	0,012	0,13	0,04
1ш	ОД+ЕШП	0,57	0,68	0,28	0,011	0,004	0,11	0,04
2ш	ОД+ЕШП	0,57	0,73	0,32	0,010	0,008	0,13	0,03
3ш	ОД+ЕШП	0,55	0,65	0,26	0,010	0,004	0,12	0,04
	М	0,59	0,76	0,26	0,010	0,027	0,11	0,15
4ш	М+ЕШП	0,56	0,73	0,25	0,010	0,015	0,11	0,10
	М	0,57	0,75	0,37	0,013	0,021	0,13	0,16
5ш	М+ЕШП	0,57	0,72	0,34	0,013	0,012	0,13	0,13

Як уже зазначалося, одним з головних джерел надходження кисню при ЕШП є оксиди, що утворюються на поверхні електрода в процесі переплавки, а також пічна атмосфера, з якої кисень переходить в рідкі фази. За основу можна взяти наступний механізм окислення шлакової ванни і передачі кисню рідкого металу [2].

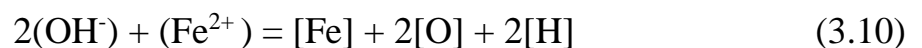
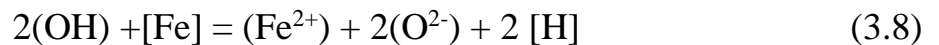
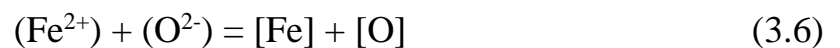
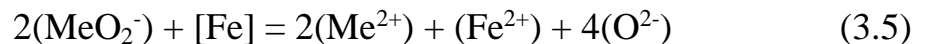
На поверхні шлакової ванни відбувається адсорбція кисню:



яка супроводжується іонізацією атомів кисню і окислення присутніх в шлаку катіонів заліза, марганцю, титану та інших нижчої валентності до катіонів вищої валентності:



Аніони  $FeO_2^-$  і  $TiO^-$  дифундують через шлак до металу. На кордоні шлак-метал аніони тривалентних металів відновлюються до двовалентних:



Припускаючи, що в рідкій металевій ванні оксидні включення відсутні, можна зробити висновок, що в процесі формування злитка ЕШП

в ньому утворюються нові ендовключення [36]. Хімічний склад і кількість цих включень визначаються активністю розкислювачів присутніх в металі і кількістю розчиненого в металі. В разі необхідності отримання металу особливої чистоти по кисню і, отже, по оксидним включень, можна використовувати при ЕШП кислі шлаки.

Певний інтерес представляє математична модель поведінки водню при ЕШП, запропонована японськими дослідниками. Ця модель включає в себе практичні фактори, що регулюють концентрацію водню: тиск водяної пари, площа поверхні розділу газ-шлак, поверхню розділу газ-шлак визначає швидкість накопичення водню.

На поверхні розділу газ-шлак має місце реакція



$$K' = \frac{\alpha^2_{OH}}{P_{H_2O} \alpha_{O^{2-}}}$$

Між шлаком і розплавленим металом має місце наступне рівновагу:

$$\alpha_{(OH)} = \sqrt{\frac{P_{H_2O} \alpha_{O^{2-}}}{K'}} \quad (3.12)$$

Швидкість переходу на поверхні розділу газ-шлак визначається рівнянням



$$\alpha_{(OH)} = \frac{\alpha_H \alpha_O}{\kappa_2 \alpha_{Fe^{2+}}} \quad (3.15)$$

$$\eta = \kappa\beta_1(S - s)(\alpha_{(OH)}^i - \alpha_{(OH)}) \quad (3.16)$$

$$\eta = \beta_0([H] - [H]_0)f = \beta_1W_s \frac{d\alpha(OH)}{dt} \quad (3.17)$$

$$[H] = \frac{K\eta A \sqrt{P_{y_{O_2 O}} + \gamma[H]_0}}{K\eta + \gamma} + [H]_s - \frac{K\eta A \sqrt{P_{y_{O_2 O}} + \gamma[H]_0}}{K\eta + \gamma} \times \exp\left\langle -\frac{\eta + \gamma}{\eta W_s} t \right\rangle \quad (3.18)$$

$$\text{де } A = \sqrt{\frac{K_2}{K_0 K_1 \alpha_0}} \quad (3.19)$$

$$\mu = \frac{(H)}{[H]} \quad (3.20)$$

$$\gamma = \frac{f}{S - s} \quad (3.21)$$

Розрахунки з використанням цієї математичної моделі показують, що за інших умов піч з круглим кристалізатором є кращою з точки зору зменшення перенесення водню з атмосфери до злитка ЕШП. Тому було випробувано електропіч з круглим кристалізатором діаметром 1 дюйм. Вимірювання концентрації залишкового водню в зразках, вирізаних з колісних дисків вакуумною плавкою, показало, що вміст водню в металі і в кристалізаторі 500x500 становить  $2,3 \cdot 10^{-5}\%$ , а в кристалізаторах 565x565 мм і 415x415 мм -  $2,5 \cdot 10^{-5}\%$ , що підтверджує ефективність використання круглого кристалізатора. Підтверджено ефективність використання обладнання: для запобігання агломерації в електрофільтрі було розроблено

схему видалення домішок за допомогою водню та інших газів, зубчастого електростатичного поля між витратним матеріалом і не витратним холостим електродом, а також використання плазми для кругового переміщення шлікера і керування процесом. Оскільки газоподібні продукти руйнуються; В вириваються негативні або позитивні електрони (наприклад, водень Н), спрямована напруга може бути створена за допомогою джерела постійного струму, незалежного від джерела змінного струму.

Поведінка азоту під час ЕШП також залежить від початкового вмісту азоту в металі, форми, присутньої в сталі, складу використовуваного флюсу і режиму розчинення.

При використанні флюсів АНФ-6 (на основі  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ) в умовах ЕШП можливе утворення в шлаку іонів  $\text{CN}^-$  і перехід азоту в метал оксидами типу  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . За результатами оцінки неметалевих включень за ГОСТ 1778-70, найбільш чистий найчистіший метал було отримано за спрощеною технологією мартенівської печі та електрошлакового переплаву [10].

### 3.2 Якість металу ВДП

Для забезпечення процесу рафінування металу під час переплаву в доменній печі необхідні кристалізатори низького тиску, високі температури і відносно низькі швидкості плавлення електродів. Відомо, що включення можуть бути видалені під час рафінуючої переплавки у вакуумі двома способами: механічно, тобто спливанням включень або винесенням їх на поверхню потоком металу, і після дисоціації матеріалу включень у вигляді газоподібних сполук  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  і т.д., один або обидва з яких утворюють включення з металу. Суть методу полягає у видаленні елементів.



Наші дослідження показали, що метали, отримані методом електроерозійної обробки, містять менше домішок кольорових металів, ніж метали, отримані методом електродугової обробки.

Наприклад, концентрація миш'яку і міді в металі ВДП першої плавки від мартенівської печі була знижена на 50 і 57% відповідно (табл. 3.2).

У зв'язку з цим практичний інтерес представляє фізико-хімічний аналіз процесів випаровування домішок кольорових металів у ВДП. Як відомо, в процесі ВДП відбувається рафінування сталі за рахунок випаровування домішок, в тому числі і кольорових металів.

Поряд з позитивними ефектами рафінування, існують і негативні наслідки процесу ВДП. Випаровування компонентів з високою пружністю пари може призвести до зменшення вмісту легуючих елементів, таких як марганець, магній, кальцій і селен. Швидкість міграції компонентів з розплавленого стану в парову фазу в умовах вакууму визначається масопереносом компонентів з розплавленого стану, міграцією компонентів вздовж поверхні розділу метал-газ і власне випаровуванням.

У даній роботі вивчався вплив технічних параметрів ВДП на зниження виходу марганцю (випаровування), а також на зміну вмісту інших елементів і розподіл домішок.

Вихід марганцю за різних умов металізації також можна спрогнозувати за допомогою рівнянь, що пов'язують концентрацію марганцю у вихідному і розплавленому металі зі швидкістю плавлення і розміром електрода.

Було зроблено висновок, що процес випаровування марганцю в ВДП частково обмежений дифузією атомів через прикордонний шар на межі розділу метал-газ. Тому для зменшення оксиду марганцю необхідно максимально зменшити зазор між електродом і кристалізатором, збільшити силу струму і використовувати інертні гази. Витрата інертного газу у вакуумній системі повинна бути відрегульована таким чином, щоб

тиск в зоні дуги підтримувався вище модуля пружності парів марганцю, але в межах діапазону, використовуваного для ВДП.

У зв'язку з цим, ВЕРХ точильної сталі проводили при співвідношенні діаметрів між електродом і кристалізованим матеріалом 0,80, а плавлення завершували в робочому режимі (9,5 кА) з використанням інертної атмосфери. Дослідження хімічного складу металу ВДП показало, що вміст кремнію, хрому, нікелю та алюмінію практично не змінився.

Таблиця 3.3 – Вміст миш'яку та міді у колісній сталі ЕШП та ВДП початкового мартенівського металу

Плавка	Метал	As	Cu
	Початковий	0,004	0,14
4ш	М-ЕШП	0,004	0,14
5ш	М-ЕШП	0,004	0,10
6ш	М-ВДП	0,002	0,06

Як відомо, на швидкість поглинання або видалення азоту в тиглі вакуумної індукційної печі робить істотний вплив присутність в металі поверхнево-активних елементів - кисню і сірки. Вважають, що такий вплив пов'язано зі зменшенням числа вакансій на кордоні розділу фаз внаслідок збагачення кордонів цими елементами. Аналіз наших даних підтверджує залежність ступеня деазотації від концентрації сірки в металі.

Так, наприклад, при вмісті сірки в вихідному мартенівському металі 0,021 ступінь деазотації становить 18%, а при вмісті сірки в електропічний металі 0,012% - 40% (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Хімічний склад виплавки колісної сталі мартенівської та електродугової виплавки при ВДП

Плавка	Метал	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	ОД	0,55	0,73	0,33	0,011	0,012	0,13	0,04
1ВД	ОД+ВДП	0,55	0,64	0,32	0,013	0,012	0,13	0,04
2ВД	ОД+ВДП	0,52	0,56	0,33	0,014	0,012	0,14	0,04
	М	0,57	0,75	0,37	0,013	0,021	0,013	0,16
ЕВД	М+ВДП	0,52	0,63	0,36	0,014	0,019	0,012	0,14

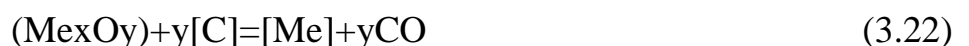
Тому не виключено, що перехід атомів азоту через межу розділу метал-газ може обмежувати загальний процес видалення азоту у ВДП.

Дослідження поведінки водню у ВДП, як і в ЕШП, пов'язане з труднощами відбору проб. З цієї причини це питання не вивчалось детально. На основі результатів, отриманих в результаті аналізу поведінки марганцю та азоту, були зроблені деякі висновки щодо видалення водню.

Згідно з отриманими даними, константа швидкості видалення водню вважається в 6-7 разів вищою, ніж для азоту. В результаті переплаву у вакуумно-дуговій печі вміст водню повинен знизитися більш ніж на порядок порівняно з початковим рівнем, що і відбулося.

Переплавка металу у вакуумно-дугових печах передбачає ефективне видалення кисню, кількість якого в основному обумовлена розкисненням і наявністю в сталі вторинних продуктів окислення.

Очищення металу від кисню відбувається наступним чином. Часткове розкислення сталі відбувається в результаті реакції, коли вуглець взаємодіє з киснем пухкого оксиду в пливці рідкого металу на кінці електрода.



і значним виділенням кисневих включень на поверхні розплаву. Процес, за допомогою якого кисень повністю видаляється, ймовірно, відбувається на поверхні розплаву металу.

Дослідження природи сульфідних включень показали, що вони утворюються з ядер, які виникають на межі розділу фаз. Великі включення (4,5-4 мкм) формуються в об'ємі пересиченої рідкої фази. Утворення сульфідних включень зумовлене не тільки концентрацією сірки, але й підвищенням її активності внаслідок зрідження вуглецю.

Як і в ВДП, забрудненість вихідного металу в мартенівській печі та електродуговій плавці досліджували шляхом підрахунку постійної кількості включень у полі зору, згідно з ГОСТ 1778-70 (табл. 3.4). З таблиці видно, що в металі ВДП в основному присутні сульфідні та оксидні включення, тоді як силікати настільки дисперсні, що їх неможливо оцінити за використаною шкалою.

Схильність металу експериментальних коліс до утворення пластівців вимірювали у всіх розплавах. Результати дослідження показують, що всі колеса є протифлокенними.

### 3.3 Механічні властивості металу ЕШП та ВДП

Глибоке очищення металу від неметалевих включень і газів в процесі виплавки, зменшення дендритної мікроструктури і хімічних неоднорідностей, забезпечує отримання зливків з щільною макроструктурою, підвищуючи рівень механічних властивостей сталі і знижуючи її варіабельність.

Неметалеві включення впливають на розмір зерна, визначають стан границь зерен, а також виступають концентраторами напружень в металі.

Дослідження з визначення неоднорідності напружень навколо включень шляхом вимірювання мікротемпературних ЕРС на межі метал-включення та рентгеноструктурні дослідження другого типу напружень

показали, що найбільші значення напружень виникають навколо деформівних включень неправильної форми в глиноземі та високоглиноземистих алюмосилікатах.

Максимальні напруження навколо окремих включень відповідають найбільш гострим кутам поверхонь включень.

Величина напружень навколо пластичних включень залежить від розміру включення. Наші експерименти (табл. 3.4) встановили, що завдяки процесам, які сприяють подрібненню і більш рівномірному розподілу неметалевих включень, а також спрямованій кристалізації металу в ВДП, колісна сталь має значно більший запас пластичності, а також покращені міцнісні властивості.

Це добре узгоджується з даними [3]. Однією з основних властивостей колісних сталей є ударна в'язкість, яка, як уже зазначалося, повинна бути не менше 0,2 МДж/м при 20°C.

Дослідження зміни значень ударної в'язкості та ободів коліс з температурою проводили на зразках розміром 10 X 10 X 55 мм, вирізаних за типом 1 згідно з ГОСТ 9454-60, в маятниковій ударній установці.

Зразки вирізали в радіальному напрямку від диска.

Дослідження показало, що метали ЕШП мають вдвічі вищу ударну в'язкість, ніж звичайні метали, як при позитивних, так і при негативних температурах. Значення для металу ВДП, який містить вдвічі більше сульфідів, ніж ЕШП, є нижчими при 20°C (0,4 МДж/м<sup>2</sup> порівняно з 0,52 МДж/м<sup>2</sup>), але досягають 0,22 МДж/м<sup>2</sup> в області -60°C.

Мінімальне значення в області -60°C також характерне для звичайних мартенівських сталей через підвищений вміст газів, домішок, кольорових металів, сірки та неметалевих включень.

Для визначення схильності сталей до холодної крихкості використовували метод, заснований на візуальній оцінці відсоткового співвідношення за допомогою електронної стереомікроскопії.

Для випробувань використовували стандартні ударні зразки: 20 (а, г, ж), -20 (б, д, в), -60 (в, е, і).

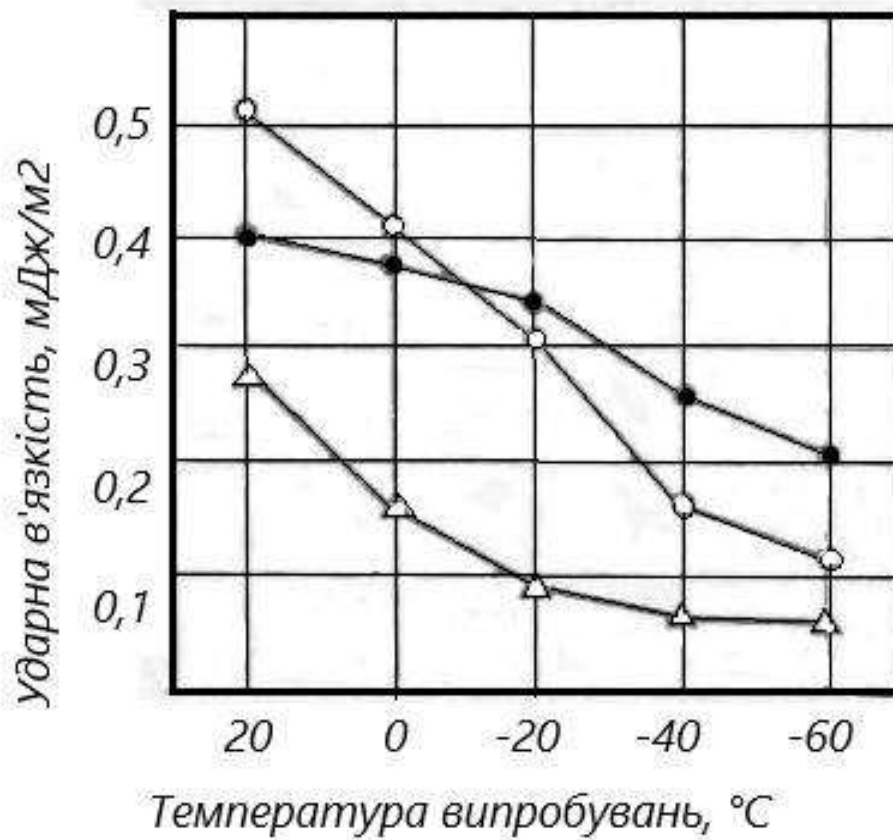


Рисунок 3.2 – Зміна ударної в'язкості колісної сталі в інтервалі температур 20...-60

Таблиця 3.5 – Зміна хімічного складу кисню, азоту та сірки в колісній сталі при ВДП

Плавка	Метал	N	O	S
	ОД	0,0104	0,0043	0,012
1ВД	ОД+ВДП	0,0062	0,0024	0,012
2ВД	ОД+ВДП	0,0059	0,0021	0,012
	М	0,0022	0,0077	0,021
3ВД	М+ВДП	0,0018	0,0023	0,019

При  $20^{\circ}\text{C}$  зламні зразків спостерігаються ділянки «чашкового» в'язкого зламу поверхні. Однак поряд з в'язким зломом в зразку мартенівської сталі (а, б, в) є ділянки з типово крихким рельєфом. Перехід в область негативних температур характеризується кристалічним зломом, в якому в металі ВДП (г, д, е) і ЕШП (ж, з, і) поряд з елементами крихкого зламу спостерігаються ділянки, які свідчать про в'язкому характер руйнування сталі. У міру зниження температури волокнистої структури зменшується і практично зникає в металі мартенівської виплавки.

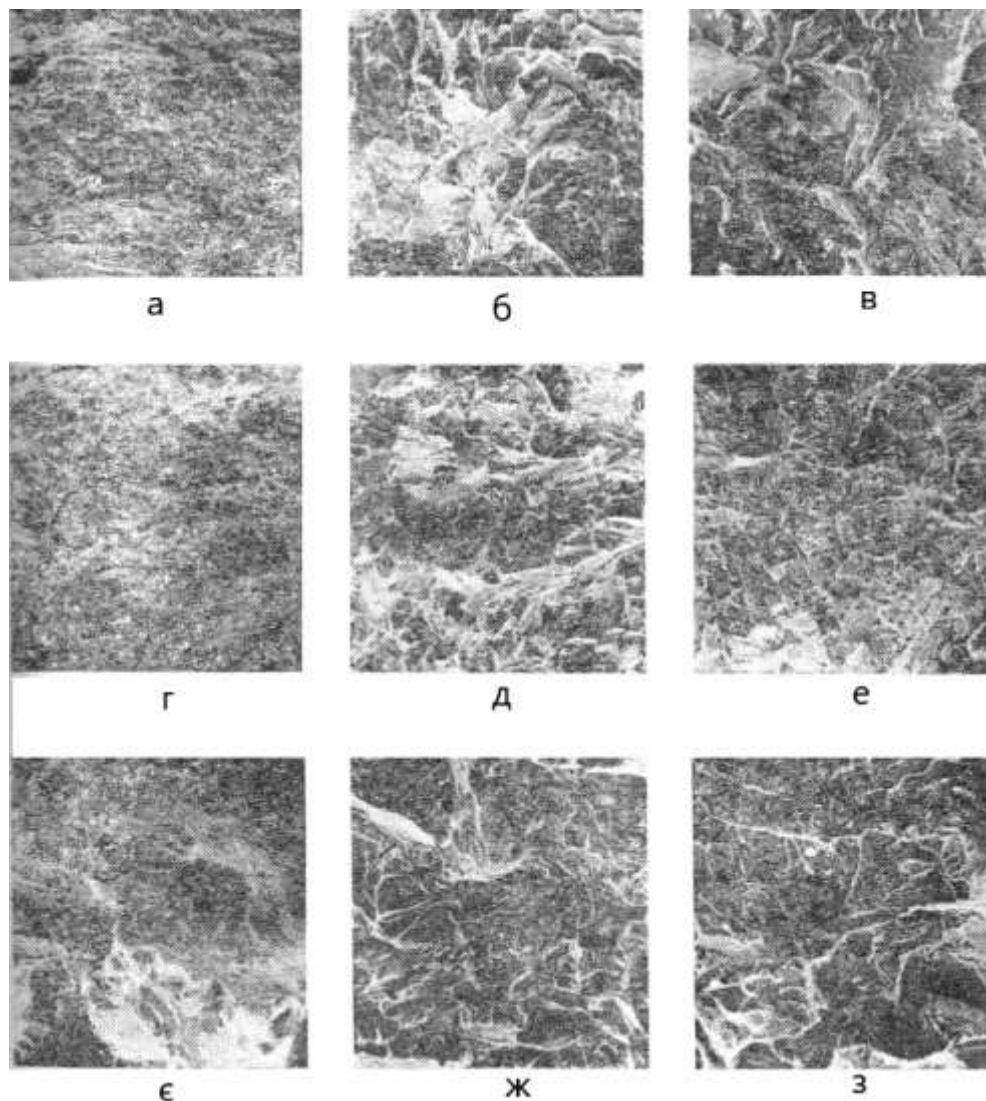


Рисунок 3.3 – Характер руйнування колісної сталі рафінуючих переплавів ЕШП і ВДП

Критична температура крихкості використовується як критерій схильності сталей до крихкого руйнування; ВДП призводить до зниження критичної температури крихкості на 20°C для всіх розплавлених металів, незалежно від вихідного металу та напрямку різання зразка, що має велике практичне значення [2].

Згідно з дослідженням, зниження ударної в'язкості свідчить про зменшення роботи зародження тріщини через збільшення вмісту сульфідів у сталі, що пояснюється тим, що сульфіди діють як фактор локалізації напружень і джерело мікротріщин.

Однак дослідження показали вищі значення ударної в'язкості для сталей ВДП, які містять вдвічі менше сульфідів, ніж сталі ЕШП. Тому вплив неметалевих включень (особливо сульфідів) на властивості руйнування колісних сталей визначається не їх загальним вмістом, а формою, розміром і розподілом [4].

Так, промислові дослідження впливу електрорафінування (ЕШП і ВДП) на електроди, що витрачаються зі сталі мартенівської печі та електродугової плавки, показали, що зміною ступеня десульфурації сталі, концентрації домішок кольорових металів, кількості та складу неметалевих включень, а також умов кристалізації можна суттєво поліпшити властивості сталі.

3.4 Теоретичні та експериментальні дослідження поведінки кисню у киплячій ванні мартенівських і електродугових печей і процесів розкислення вуглецевої колісної сталі

По ходу окислювального періоду вміст вуглецю знижується у середньому від 1,2% до 0,45%. У процесі його окислення відносна переокисленість (термін за А.М.Левіним) тобто  $m_{\phi} = [\%C] \cdot [\%O]$  також зменшується:  $m_{\phi} = 0,00301 + 0,00503 [\%C]$ . Стосовно до виробництва колісної сталі, вона повинна визначатися конкретними умовами і



параметрами окислення вуглецю.

З метою одержання зв'язку  $V_c = f(\tau)$  для конкретних умов виплавки колісної сталі статистичній обробці (40 плавок) були піддані результати аналізу зміни вмісту вуглецю при окисленні його у мартенівській печі місткістю 250 т під час окислювального періоду, тобто у функції часу. Активний кип (45-75 хв) закінчували шляхом припинення дачі руди і зварювального шлаку, чистий кип тривав до 45 хв. протягом якого іноді присаджувався невеликими порціями (до 0,5%) від ваги садки окислювач.

Таким чином, тривалість окислювального періоду склала 100-120 хв. Кількісний зв'язок  $[\%C] = f(\tau)$  можна описати виразом

$$[\%C] = 0,392 + 0,906 e^{0,0172\tau} \quad (3.23)$$

Диференціюючи цей вираз, одержана залежність швидкості окислення вуглецю  $V_c$  від часу

$$V_c = \frac{d[C]}{d\tau} = -0,017 \cdot 0,906 e^{-0,017\tau} . \quad (3.24)$$

Спільне розв'язання рівнянь дозволило знайти залежність  $V_c = \varphi[\%C]$ , яка має вигляд для колісної сталі

$$V_c = 0,017 [\%C] - 0,0066. \quad (3.25)$$

Аналіз виразу (3.25) показує, що швидкість окислення вуглецю, який міститься у ванні мартенівської печі в інтервалі 1,2-0,32%, в міру зниження вуглецю зменшується, однак темп зниження  $V_c$  незначний. Термодинамічна оцінка поведінки кисню при окисленні вуглецю у процесі виплавки колісної сталі показала, що абсолютна переокисленість

киплячої ванни стосовно до виробництва колісної сталі повинна визначатися конкретними умовами окислення вуглецю, при цьому для кожного процесу одержання сталі варто визначати необхідний вміст вуглецю у сталеплавильній ванні і побічно, фактичну концентрацію кисню у металі. При прийнятих параметрах плавки можна прогнозувати кінцевий вміст вуглецю (кисню) у сталі. Вміст кисню у киплячій мартенівській ванні колісної сталі, за даними аналізу на ексхалографі «Бальцерс», складає після розплавлення при (1,12-1,40%С) -  $(11,0-28,4) \cdot 10^{-3}\%$ , перед розкисленням ( $[\%C] = 0,55-0,60$ ) близько  $14,0 \cdot 10^{-3}\%$ , після розкислення на випуску -  $9-18 \cdot 10^{-3}\%$ . Для порівняння відмітимо, що при виплавці сталі в електропечах концентрація кисню у ній перед випуском рівнялася  $(3,7-7,0) \cdot 10^{-3}\%$ . У зв'язку з цим, технологія розкислення сталі у ковші повинна передбачати застосування певних видів розкислювачів і питома їх витрачання з урахуванням ряду інших загальновідомих технологічних прийомів [8].

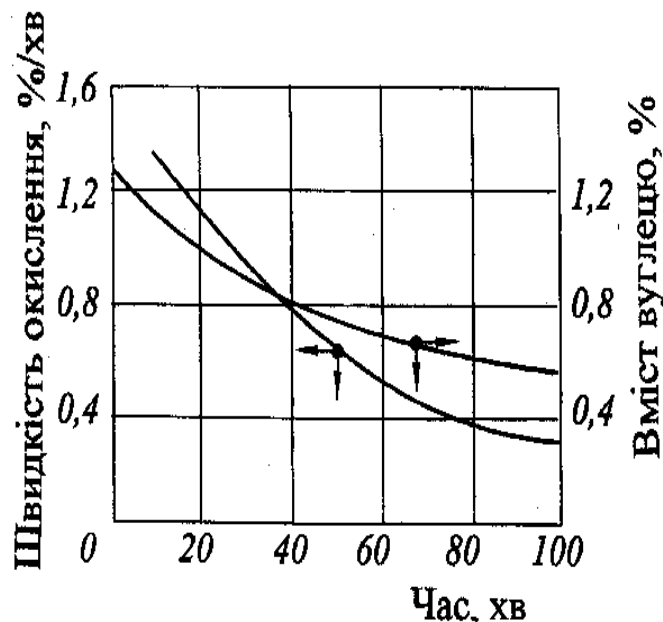


Рисунок 3.4 - Зміна швидкості окислення вуглецю і його вміст під час окислювального періоду при виплавці колісної сталі у мартенівській печі

Одним із ефективних способів зниження окисленості шлаку і металу при мартенівському процесі є застосування різних матеріалів, що містять алюміній. Встановлено, що застосування шлаку виробництва вторинного алюмінію (65-70%  $Al_2O_3$ ; 2-4%  $SiO_2$ ; 2,8-3,2%  $CaO$ ; 4,2-6,7%  $FeO$ ; 15-20%  $Al_{мет}$ ) приводить до зниження окисленості металу і шлаку на 50%, що дозволило при наступному розкисленні металу знизити витрати марганцевих та кремністих феросплавів.

Вміст кремнію у колісній сталі складає 0,40-0,60% (марка 1) та 0,22-0,45% (марка 2). Для визначення рівноважної концентрації кисню у залізі залежно від вмісту кремнію у металі можна скористатися виразом Р.Іванова.

$$\ln[\%O] = 1/2 \ln K_{Si} - 1/2 \ln[\%Si] - 1/2 \ln f_{[Si]}^{Si} - \ln f_{[O]}^{Si}. \quad (3.26)$$

Приймаючи вміст кремнію у колісній сталі рівним 0,30%, знаходимо рівноважну концентрацію кисню при 1600°C, яка складає 0,009%, що задовільно узгоджується з фактичними даними. Однак розрахунки рівноважних вмістів кисню у системі Fe-Si-O з використанням різних даних показують суттєву їх відмінність (рис. 3.4).

Причиною цього розходження є недостатність інформації як про активність компонентів, розчинених у металічних розплавах, так і про термодинамічні характеристики реакцій утворення продуктів розкислення.

Разом з тим, як видно із рис. 3.5, фактичний вміст кремнію у колісній сталі перебуває у сприятливому інтервалі концентрацій.

У колісній сталі міститься 0,80-1,20% (марка 1) та 0,50-0,90% (марка 2) марганцю. Використовуючи останні дані про залежність параметру взаємодії  $e^{MnO}$  від температури, можна з цілковитою точністю розрахувати концентрацію кисню залежно від вмісту марганцю у залізі практично при будь-якій температурі.

Як правило, перед присадкою феромарганцю у ванні колісної сталі міститься 0,011-0,018% [O]. Тому присаджений феромарганець витрачається на легування та часткове розкислення шлаку. Присадка марганцю прискорює також десульфурацію сталі, що має важливе значення при мікролегуванні колісної сталі у ковші.

При відпрацюванні технології виплавки колісної сталі в електропечах з подальшим вакуумуванням. Встановлено, що застосування алюмінію дозволяє ефективно не тільки розкислювати метал, але і подрібнювати структуру.

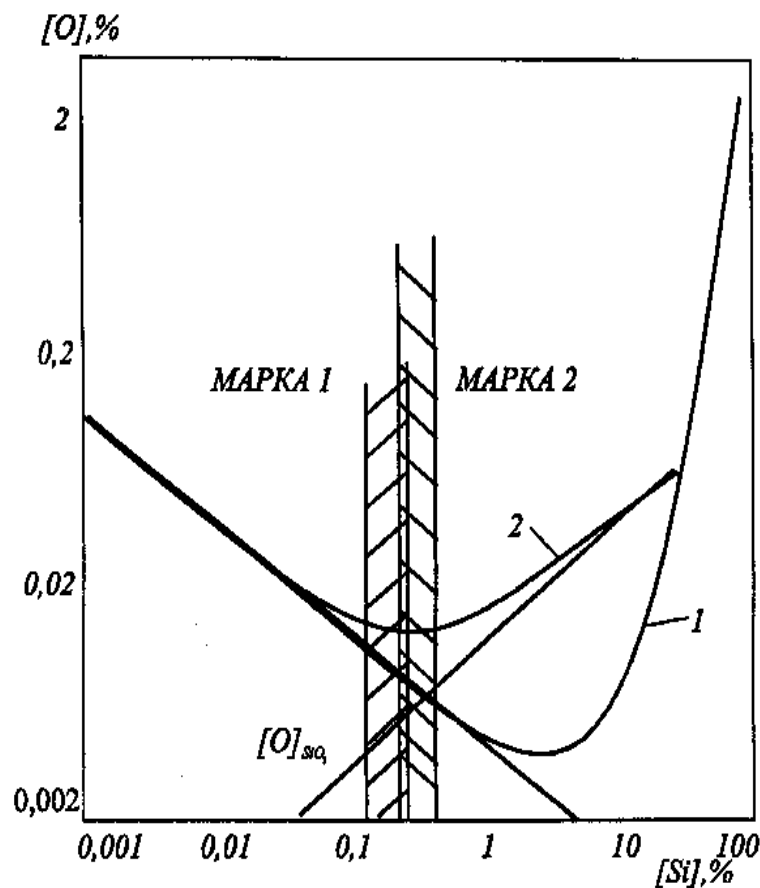


Рисунок 3.5 - Ізотерми вмісту кисню у системі Fe-Si-O за даними Нікітіна Б.М. (1) та Куликова С.І. (2)

Тому, з 2009 року обмеження щодо його застосування були зняті. Термодинамічні розрахунки з розчинності кисню у рідкому залізі

показують, що його концентрація (0,0004-0,0006%) відповідає оптимальному вмісту алюмінію 0,020-0,060%.

Незважаючи на одержані достовірні значення параметрів взаємодії для реакції розкислення заліза алюмінієм у рівноважних умовах, фактичний вміст кисню у сталі виявляється вище рівноважних. Із залежності концентрації кисню від вмісту алюмінію

$$\lg[\%O] = \lg K_{Al_2O_3} - 2/3 [\%Al] - e_O^{Al}[\%Al] \quad (3.27)$$

знайдено розрахунковий вміст кисню у залізі при 0,025% Al рівним  $13,6 \cdot 10^{-10}\%$ . Дослідний колісний метал при вказаному вмісті алюмінію містив  $35,0 \cdot 10^{-40}\%$  кисню.

Дослідженнями проведеними на кафедрі електromеталургії встановлено, що вплив магнію, як і кальцію, проявляється у зміні морфології окисних та сульфідних включень. З метою вибору варіанту розкислення колісної сталі лігатурами, що містять магній, у лабораторних умовах (індукційна піч ІСТ-0,06) були проведені плавки методом переплаву колісної сталі під шлаком з наступною розливкою металу у чавунні виливниці з прибутковими надставками для одержання злиwkів масою 10 кг. По ходу розливки у виливниці давалась лігатура ФСМг з алюмінієм (55% Si; 6,7% Mg; 5,9% Al) та цирконієм (55% Si; 7,2% Mg; 1,7% Zr). Зливки піддавалися деформації з дотриманням режимів обтиску, яких зазнає колісна заготовка при пресопрокатці. Неметалічні включення вивчалися з допомогою растрового електронного мікроскопу з енергодисперсним спектрометром. У складі окисних включень в металі, розкисленого лігатурою Mg-Zr, були наявні оксиди Mg, Zr, Si, крім цього спостерігалися відокремлені карбіди цирконію розміром (1-2 мкм). Найбільш сприятливі включення були у сталі, розкисленій лігатурою

ФСМг, що містить алюміній. Продукти розкислення мали вигляд окремо розташованих глобулів. У їх складі оксиди магнію, титану і алюмінію. Зміна фазового складу включень обумовила підвищення механічних властивостей металу. Промислове освоєння розробленої технології здійснювали у мартенівських печах НТЗ. На всіх плавках метал першого ковша розкисляли за діючою технологією, а другого - з використанням лігатури, що містить магній, у кількості від 200 кг (на 130 т ківш) до 800 кг (з повною заміною феросиліцію і лігатури СКТіА). Метал продували аргонем по ходу випуску через пористу вставку у днищі ковша. Вміст азоту і водню на дослідному та порівняльному металі знаходився практично на одному рівні. Разом з тим, застосування лігатури дозволило знизити вміст кисню на 23%. Залежно від варіанту розкислення брак заготовок складав не більше 3,57%, а за діючою технологією до 14,88%. Забрудненість дослідного металу оксидними включеннями у середньому на 0,5 бала менше, ніж у металу, розкисленого за базовою технологією. Важливою розпізнавальною особливістю оксидних включень є більш округла форма, менша деформівність при прокатці, що сприятливо позначилося на механічних та експлуатаційних характеристиках. При використанні тільки лігатури для розкислення, метал мав більш високі показники тимчасового опору розриву  $1030 \text{ Н/мм}^2$  (проти  $990 \text{ Н/мм}^2$ ), значення пластичних властивостей ( $\delta$  та  $\psi$ ) зросли на 7,5% відн. Освоєння технології розкислення колісної сталі лігатурою ФСМг з цирконієм в умовах Вексунського металургійного заводу також підтвердило її високу ефективність. Річний економічний ефект від впровадження технологічних заходів по удосконаленню режимів розкислення колісної сталі в умовах НТЗ склав 386 тис.у.г.о., а ВМЗ - 412 тис. у.г.о.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Аналіз потенційно шкідливих і небезпечних чинників виробничого середовища електросталеплавильного цеху

Виробництво сталі характеризується наявністю таких небезпечних факторів, як пи́л, загазованість, теплове випромінювання та шум на робочому місці. Оскільки для виплавки сталі на підприємствах чорної металургії можуть використовуватися мартенівські печі, конвертерні печі та електродугові печі, то в цій роботі проаналізовано всі ці способи.

Основними забруднювачами повітря на робочих місцях є пи́л та оксид вуглецю. Пи́л на основних робочих місцях коливається від 15 до 450 мг/м<sup>3</sup> (ГДК - 4 мг/м<sup>3</sup>) на завантажувальному майданчику під час розвантаження сировини, від 18 до 80 мг/м<sup>3</sup> у ливарному дворі та від 4,5 до 8,5 мг/м<sup>3</sup> у пічному дворі.

Слід зазначити, що дані по пічному прольоту характеризують стан атмосфери заводу, коли кисень не використовується для продувки ванни печі. Використання кисню для інтенсифікації розчинення (продувки ванн) на заводі без резервного обладнання для збільшення пропускної здатності газоходів викликає різке збільшення неорганізованих викидів в робочу зону пічного прольоту; при використанні двох ванн викиди пи́лу в цеховому прольоті збільшуються приблизно в чотири рази; при використанні двох ванн викиди пи́лу в цеховому прольоті збільшуються приблизно в чотири рази; при використанні двох ванн викиди пи́лу в цеховому прольоті збільшуються приблизно в чотири рази.

Концентрації оксиду вуглецю в робочій зоні становлять: у пічному прольоті - 0,02-0,03 мг/л (ГДК оксиду вуглецю 0,02 мг/л); у відділенні змащення виливниць - 0,2-0,7 мг/л; у ливарному дворі - 0,01-0,02 мг/л. Теплове випромінювання в електросталеплавильних цехах є зумовлене наявністю розплавленого металу та нагрівальних поверхонь

технологічного обладнання. Інтенсивність теплового випромінювання в робочій зоні пічного прольоту становить від 0,18 до 3,7 кВт/м<sup>2</sup>, біля завантажувальної машини при завантаженні печі - від 0,7 до 2,3 кВт/м<sup>2</sup>, на задньому майданчику на виході - від 1,4 до 2,4 кВт/м<sup>2</sup>.

У теплу пору року температура в робочій зоні біля мартенівської печі може досягати 35-37 °С, а на задній стінці біля виходу сталі - 45 °С. Основними джерелами шуму в електросталеплавильному виробництві є електропіч та обладнання, що забезпечує її роботу. Рівень звукової потужності цього обладнання становить 102-111 дБА.

Температура в печі в теплу пору року може досягати 35-40°С. На електросталеплавильних заводах основними джерелами шуму є дугові печі та самі молоти. Рівень звукової потужності цього обладнання становить 115-126 дБА. В електродугових печах шум дуги є основною складовою вихідного шуму печі. Генерація шуму під час горіння дуги пов'язана з пульсацією стовпа дуги через коливання температури.

Найбільший шум генерується в процесі плавки за рахунок розплавленої шихти. Рівень звукової потужності електропечі залежить від її потужності, складу шихти, що плавиться, і потужності, що подається на електроди. Для печі місткістю 100 тонн рівень шуму в середньому на 5 дБА вищий, ніж для печі місткістю 40 тонн. Зниження рівня шуму під час плавки дрібнодисперсних шихт (порівняно з плавкою крупнодисперсних шихт) становить 10 дБА, що пояснюється більш рівномірним і швидким нагріванням шихти, що призводить до більш стабільного горіння дуги. Якщо потужність, що подається на електроди, збільшити в чотири рази, то рівень шуму в печі зростає на 17 дБА. Таким чином, при збільшенні потужності трансформатора з 25 МВА до 32 МВА рівень шуму 100-тонної дугової печі збільшується на 5-7 дБА. Таким чином, сучасна тенденція до збільшення потужності пічного трансформатора призводить до збільшення рівня шуму печі.



Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого трудового процесу  
плавильника

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	3 клас: шкідливі та небезпечні умови та характер праці			Тривалість дії фактора за зміну, %
				1 ст.	2 ст.	3 ст.	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup> : 3 клас безпеки Фториди алюмінію, кальція, магнія, міді, хрому	0,2	0,25	1,25 р			92,36
	3 клас безпеки Вуглецю оксид	20,0	54,0		2,7р		
	3 клас безпеки оксиди азоту	5,0	10,8		2,16р		
2	Пил, переважно фіброгенної дії, мг/м <sup>3</sup>	2	9,46		4,73		92,36
3	Шум, дБА	80	84	4			92,36
4	Вібрація (загальна),дБ	92	96		4		92,36
	Мікроклімат у приміщенні (теплі період): - температура, °С; - швидкість руху повітря, м/с; - відносна волога повітря, %; - інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	13-26 0,2-0,5 40-60 140	40 0,3 35 2550			12 2410	
6	Тяжкість та напруженість праці	категорія праці – тяжка, III напружена					

Таким чином, проведений аналіз умов праці дозволяє зробити висновок про перевищення нормативних показників по рівню інфрачервоного випромінювання, шуму, вібрації. Перевищує допустимі концентрації також кількість пилу та оксиду марганцю у повітрі робочої зони. Все це дозволяє віднести умови праці до III класу 3 ступеня. За

показниками робоче місце слід вважати з особливо шкідливими і важкими умовами праці.

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

Для поліпшення умов праці на заводі і захисту працівників від теплового впливу вживаються такі заходи: ізоляція тепловипромінюючих поверхонь водоохолоджуваними екранами, щитами, завісами тощо; ізоляція та охолодження цехів (постів управління, приміщень кранівників тощо); природна (вентиляційна) вентиляція; закриття печей під час ремонтних робіт повітряне охолодження приміщень тощо. природна (вентиляційна) вентиляція, повітряне охолодження закритих просторів печей, що ремонтуються тощо), природна (вентиляційна) та механічна вентиляція, повітряне охолодження закритих просторів печей, що ремонтуються, зрошення цехів та припливних вікон, спецодяг та засоби індивідуального захисту (щитки, екрани, окуляри, світлофільтри), раціональна організація режиму праці та відпочинку, робочих місць та роботи в умовах опромінення регламентація робочого часу, облаштування спеціальних зон, кабін і кімнат відпочинку.

Шум є поширеним біологічним подразником і за певних умов може впливати на всі органи і системи людського організму. Якщо звуковий тиск занадто високий, це може призвести до розриву барабанних перетинок. Звукоізоляція - один з найефективніших і найпоширеніших методів зниження промислового шуму.

Звукоізоляційні стіни можуть знизити рівень шуму на 30-40 дБ. Ефективними звукоізоляційними матеріалами є метал, бетон і дерево.

Засоби індивідуального захисту від шуму можна розділити на протишумні навушники, які закривають вушний канал, протишумні

вкладиші, які закривають вушний канал, протишумні каски або шоломи і протишумні костюми.

Для зниження рівня вібрації всі віброгенеруючі агрегати (робочі машини, рейковий транспорт, двигуни, вентилятори) повинні встановлюватися на самостійних фундаментах, ізольованих від перекриттів та інших будівельних конструкцій, або на спеціально розроблених амортизаторах зі сталевих пружин або еластичних матеріалів. Для зменшення вібрації і передачі шуму по повітропроводах і трубопроводах їх з'єднують з вентиляторами і насосами за допомогою гнучких гумовотканинних вставок або гумових труб. Інтенсивність вібрації компонентів установки знижується шляхом облицювання їх поверхонь або заповнення спеціально спроектованих порожнин вібропоглинаючим матеріалом.

Для захисту працівників від впливу шкідливих хімічних речовин на феросплавних заводах впроваджуються такі заходи: відсмоктувачі та витяжні зонти від джерел шкідливих речовин. Гази з склепіння печі очищаються мокрими апаратами: трубами Вентурі і бризкоуловлювачами. Пічний зонт обладнаний одним рукавним фільтром для кожного з двох джерел викидів.

Відповідно до встановлених норм, засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) безкоштовно надаються робітникам і службовцям, пов'язаним зі шкідливими умовами праці, особливими температурними умовами та фізичним забрудненням. Сюди входять засоби захисту очей, органів дихання та слуху від шуму, захист від вібрації, захисні мазі та спеціальний одяг. Найпоширенішим засобом захисту очей є захисні окуляри, які захищають очі від шкідливих впливів і повинні бути максимально вільними в плані огляду, не запотівати, забезпечувати чіткий огляд, вентилуватися, добре сидіти на обличчі і не подразнювати шкіру. Крім того, окуляри повинні бути міцними і легкими [13].

Наразі для захисту від пилу використовуються "пелюсткові" безклапанні респіратори та клапанні респіратори: з ватними фільтрами, з повстяними фільтрами та з паперовими фільтрами. Ефективність протипилових респіраторів досягає 100% при нормальній вологості повітря.

Фільтруючі протигази використовуються для захисту органів дихання від шкідливих парів і газів. В якості адсорбентів використовуються активоване вугілля, силікагель та хімічні сорбенти [12].

Найбільш зручними та ефективними засобами захисту від шуму є навушники різних марок. Навушники кріпляться на голові за допомогою спеціальної застібки, яка щільно прилягає до голови.

#### 4.3 Заходи з електробезпеки

Електросталеплавильний цех характеризується широким спектром обладнання. Це електродугові печі з трансформаторами, механізовані мостові крани для подачі шихти і продуктів плавки, різні бункери для зберігання сировини, завалювальне обладнання, дробарки, підземні бункерні живильники, обладнання для сушіння ковшів і розливні машини. Крім того, завод має низку допоміжних споруд, включаючи робочі кабінки, складські приміщення та побутові приміщення. Завод класифікується як вибухонебезпечна зона.

Безпека електроустановок забезпечується такими захисними заходами: заборона доступу до струмоведучих частин, використання ізоляції, блокування, низька напруга, використання трифазного струму з ізольованою нейтраллю, захисне заземлення, а в разі пересувних електроустановок - захисне відключення. Підлога майданчика доменної печі, робочий майданчик навпроти колошника печі та майданчик обслуговування електродів є неструмопровідними.

Для обслуговування електроустановок використовуються основні та додаткові засоби захисту. До основних засобів захисту відносяться захисні засоби, ізоляція яких надійно витримує робочу напругу обладнання і допускає прямий контакт зі струмоведучими частинами, що знаходяться під напругою. До додаткових засобів захисту відносяться захисні засоби, які підвищують ефективність основних засобів захисту і забезпечують безпеку при дотику і кроковій напрузі. До засобів індивідуального захисту належать ізолюючі штанги, ізолюючі кліщі, діелектричні боти, діелектричні рукавички та ізолюючі підставки [13].

#### 4.4 Заходи пожежної безпеки

Будівлі електросталеплавильних цехів (печей) за вибухопожежною та пожежною небезпекою відносяться до категорії "Г". На заводі є низка джерел пожежної небезпеки, серед яких відкриті колосники печі для нагрівання руди, гарячі продукти з промковша під час розливання, потужні електроустановки та розгалужена кабельна мережа. Пожежі та вибухи в печах можуть бути спричинені падінням сировини в піч, контактом розплавленого металу або шлаку з водою, а також несправністю електромереж або електроустановок.

Залежно від рівня пожежної небезпеки, виробничі приміщення комбінату обладнані різними системами пожежогасіння. Корпус готової продукції обладнаний укомплектованими пожежними щитами, ящиками з піском та пожежними кранами з рукавами. У трансформаторній доменній печі встановлено вуглекислотний вогнегасник і ящик з піском. Пожежні крани, вогнегасники та ящики з піском встановлені у вахтовому приміщенні електропічного корпусу.

Для запобігання пожеж, викликаних короткими замиканнями, на лініях і відгалуженнях електричної мережі послідовно встановлені запобіжники. При протіканні надмірного струму запобіжник перегорає,

перериваючи електричний ланцюг і запобігаючи нагріванню проводів і виникненню пожежі.

Для запобігання поширенню вогню підтримується протипожежна відокремленість між будівлею та обладнанням, встановлюються автоматичні системи пожежогасіння та здійснюється систематичний контроль за дотриманням заходів пожежної безпеки, наявністю та справністю засобів пожежогасіння та первинних засобів пожежогасіння.

Будівлі спроектовані таким чином, щоб забезпечити швидку та безпечну евакуацію у випадку пожежі. Допустимий час евакуації визначається часом, необхідним для досягнення небезпечних для людини умов (критична температура ( $60^{\circ}\text{C}$ ), знижена концентрація кисню, втрата видимості через дим). Довжина евакуаційного шляху (відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого евакуаційного виходу) в будівлі електрореакторного відділення (категорія В, II-Па) не перевищує 100 м і відповідає вимогам пожежної безпеки [29].

Відповідно до стандарту, на станції є такі основні засоби пожежогасіння: вогнегасники (ОХП-10, ОУ-5, ОУ-8, ОУ-25), протипожежний інвентар (покривало з негорючої утепленої тканини, груба вовняна тканина або повсть, ящик з піском, лопата), протипожежний інструмент (багор, лом, сокира та ін.).

## ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологій виплавки вуглецевої сталі колісного сортаменту в умовах Нижньодніпровського трубопрокатного заводу в аспекті відповідності діючих технологічних режимів мартенівської плавки, розкислення і позапічної дегазації аргоном, основним положенням сталеплавильних процесів і вимогам нормативних документів «Укрзалізниці» до якості металу цільнокатаних коліс широкого сортаменту і різного функціонального призначення: рухомого складу залізничного транспорту, локомотивів і вагонів метрополітену.

2. Встановлено, що виробництва якісної колісної сталі можливе переважно у дугових електропечах основним процесом з наступним обов'язковим вакуумуванням рідкої сталі.

3. На підставі аналізу вкладу металургійних факторів (взаємодія вуглецю і кисню у розплавах, вміст газів, режими розкислення, температура металу на випуску, умови кристалізації та ін.) на показники якості вуглецевої сталі, літературних, експериментальних даних і результатів досліджень зроблено висновок, що ефективним способом комплексного підвищення механічних характеристик колісної ферито-перлітної сталі є подрібнення її структури, підвищення стійкості металу до перегріву, зниження ступеню локалізації електронів на міжкристалітних зонах, переведення зернограничних сегрегуючих елементів у стійкі вторинні фази сприятливої форми.

4. Проведений аналіз даних теоретичних досліджень щодо розчинності кисню у залізі, а також оцінка його поведінки при окисленні вуглецю мають важливе значення для термодинамічних розрахунків активності кисню і сірки у рідкій сталі.

5. Для забезпечення рухомих складів спеціального призначення надійними колесами, виконано комплекс досліджень і дослідно-промислових плавок по підвищенню якості колісної сталі

електрорафінуючими перепадами - ЕШП та ВДП, що дозволило також виявити потенціальні гранично можливі властивості вуглецевої ферито-перлітної сталі, як конструкційного металу для цільнокатаних коліс, одержуваних пресопрокаткою. Дослідження впливу перегріву рідкої вуглецевої сталі при рафінуючих електроперепадах на переохолодження і структуроутворення металу з використанням диференційно-термічного аналізу показали, що висока однорідність і дисперсність металу ЕШП обумовлені не тільки направленим і прискореним тепловідводом, але і значним переохолодженням розплаву, що кристалізується.

6. Технологія ЕШП колісної сталі з модифікуванням комплексною лігатурою, що містить Si, Ca, Mg та РЗМ, і розкисленням силікокальцієм. Металофізичні і фізико-механічні випробування показали, що макроструктура зливків має дуже щільну будову, без явно виражених структурних зон, величина природного зерна металу ЕШП, у середньому, на 2 бали менше поточного, при цьому міжпластинчаста відстань у перліті дорівнює 0,17 мкм; за твердістю та міцністю дослідний метал значно перевершує порівняльний без зниження пластичних властивостей, ударна в'язкість при позитивній температурі вище у 1,3-1,8 рази, а при негативній - у 2,2-2,8 рази. Це забезпечило дослідним колесам підвищені експлуатаційні властивості з небачиним раніше поєднанням високої міцності при одночасно високій пластичності і в'язкості. Для рухомого складу особливо відповідального призначення рекомендовано використовувати колеса із металу ЕШП по ТУ 14-15-185-88 «Колеса цільнокатані діаметром 950 мм із сталі електрошлакового перепаду».



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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 школа, 2006. 503 с.
2. 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.
3. 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.
4. Смірнов О. М., Макуров С. Л., Сафонов В. М. Виробництво зливків сталі та промислових сплавів : навч. посіб. Донецьк : Ноулідж, 2013. 405 с.
5. Попович В. В., Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Львів : Світ, 2006. 624 с.
6. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів. Київ : Кондор, 2006. 528 с.
7. 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.
8. Збожна О. М. Основи технологій : навч. посіб. Тернопіль : Картбланш, 2002. С. 30–58.
9. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Київ : Наука, 2005. С. 45–48.
10. Афтандіянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г., Поліщук А. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Конспект лекцій в 2-х книгах. Київ: НУБіП України, 2016. 125 с.

11. Сологуб М. А., Рожнецький І. О., Некоз О. І. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. Київ : Техніка, 2002. С. 374.
12. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Книга І. Львів. 2000. С. 264.
13. Попович В., Голубець В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Книга ІІ. Суми : Університетська книга, 2002. С.259.
14. Сталеплавильне виробництво: навч. посіб. / В.І. Баптизманський та ін.]. Київ : ФЗМН, 1996. 400 с.
15. Сборник технологических инструкций по выплавке стали в открытой дуговой печи. Запорожье : ОАО «Днепрспецсталь», 2004. 245 с.
16. Державні санітарні правила "Підприємства чорної металургії" ДСП 3.3.1.038-99.
17. Наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».
18. Наказ МОЗ України «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони» 14.07.2020 № 1596.
19. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.
20. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вібраційна безпека. Загальні вимоги.
21. ДСТУ 3038-95 Гігієна. Терміни та визначення основних понять.
22. ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартів безпеки труда. Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты. Общие технические требования (ГОСТ 12.4.221-2002, ИДТ).
23. НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безопасной эксплуатации электроустановок (ДНАОП 1.1.10-1.01-97).

24. 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)).
25. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
26. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.

**ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

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

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

**17-20 жовтня 2023 року**

Запоріжжя

2023

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

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

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

У комплект установки входить: занурювана фурма, що складається з порожнього металевго стержня, футерованої шамотними трубками, механізм підйому і опускання фурми, піч для сушіння та зберігання занурюваних фурм і ін.

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

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

УДК 669.1

Кириченко О.Г., к.т.н., доц., Ісенко О.В., магістрант 2 курсу,  
Борсук С.А., ЗдВО 2 курсу,  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Кириченко О.Г.

### **ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ КОЛІСНОЇ СТАЛІ**

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

Проблема підвищення якості цільнокатаних коліс може бути розв'язана комплексно у взаємозв'язку шляхом удосконалення діючих технологій виплавки і розливки сталі та наукового пошуку більш придатних режимів пресопрокатки заготовок, протифлоєнної обробки та оптимізації параметрів термічної обробки (нагрів під загартування, прискорене охолодження та низькотемпературний відпуск). Однак цілком очевидно, що якість кінцевої продукції у цій складній технологічній схемі виробництва коліс багато в чому



визначається первісно властивістю сталі, впливом ряду металургійних факторів на стадії виплавки металу у печі, позапечної обробки та розливки.

Аналіз умов експлуатації залізничних коліс і факторів, що визначають їх надійність і довговічність, і, врешті-решт, безпеку руху поїздів, показав, що такі характеристики, як ударна в'язкість, пластичність, поріг холодноламкості, залежать, перш за все, від якості сталі: хімічного складу, вмісту газів, забрудненості неметалічними включеннями, термообробки, величини зерна і структурного стану.

Для виготовлення суцільнокатаних залізничних коліс застосовують, в основному, вуглецеву сталь.

Вуглець – найбільш важливий і доступний елемент у сталі. Збільшення його вмісту у металі підвищує міцність, але знижує пластичні, а також погіршує стійкість проти утворення теплових пошкоджень.

Під час аналізу виробництва колісної сталі було виявлено три найбільш ефективних технології виробництва колісної сталі.

Першим методом є виплавка колісної сталі у мартенівських печах. При виплавці сталі скрап-процесом шихтову підготовку (чавун і лом) виробляють таким чином, щоб вміст вуглецю по розплавленню становило 1,20-1,50%.

Як флюс використовують свіже обпалене металургійне вапно (допускається застосування вапняків і повітряно-сухого бокситу) і ставролітовий концентрат (0,8-1,0% від маси плавки).

Виплавка сталі скрап-процесом ускладнюються тією обставиною, що застосовується в шихті чушковий мартенівський переробний чавун містить 0,040-0,060% S, в результаті чого її концентрація в металі по розплавленні завалювання може досягати 0,06%.

Перспективами для виплавки колісної сталі являються застосування чавуну, підданого десульфурації в ковші магнієм.

Для розкислення колісної сталі застосовують доменний феромарганець, силікомарганець, 25- і 45%-ий феросиліцій.

Другим методом є виробництво колісної сталі у кисневих конвертерах. На Дніпровському металургійному комбінаті введено конвертерний цех з конвертерами по 250 т.

На відміну від традиційного методу продувки чавуну шляхом подачі кисню через фурму, що вводиться у шихту, продування металу в цих конвертерах може проводитися зверху і знизу через днище із захистом струменя кисню.

Третім методом є виробництво колісної сталі в електropечах. У завалку печі ДСП-30 використовувався сталевий вуглецевий брухт (99%) і кокс (1%). Після повного розплавлення шихти сідає руду (0,42 кг/т) до спінювання шлаку. Потім шлак скачували і наводили новий з вапна (0,4 т), плавикового шпату (0,01 т) і бою шамоту (0,020 т). Окислення ванни виробляли рудою в кількості 2,15 кг/т, а також газоподібним киснем в кількості 5-7 нм<sup>3</sup>/хв.

Протягом окисного періоду було окислено 0,32-0,51%. Швидкість окислення вуглецю становила 0,31-0,51%/год. Після закінчення окисного періоду частина окисного шлаку, що залишився шлак розкисляють порошками коксу і феросиліцію. Загальна тривалість окисного періоду становила в

середньому 50 хв. Метал з печі випускали після досягнення температури 1610-1620 °С. Остаточне розкислення сталі виробляли в ковші алюмінієм або силікокальцієм. Алюміній в метал вводили на штангах (0,3 кг/т), а кусковий силікокальцій.

Незважаючи на значні коливання вмісту азоту в металі від плавки до плавки для кожного варіанта виплавки і розливання, в цілому. В колісній сталі в разі виплавки її в електропечах вміст азоту в порівнянні з мартенівським способом виробництва значно менше.

В середньому концентрація азоту в металі становить 0,0103 в той час як при виплавці такої ж сталі в мартенівських печах вміст азоту в дослідженому нами металі становить, в середньому 0,0058 (при коливаннях від 0,0049 до 0,0067).

Таким чином, з усіх випробуваних варіантів виплавки найбільш чистою за вмістом газів і сірки отримана сталь за наступними технологічними варіантами виробництва:

а) виплавка одношлаковим процесом з розкисленням металу алюмінієм і подальшим вакуумуванням. Ця здатність сталі характеризується найменшою концентрацією кисню (в середньому 0,0038%) і азоту (0,0098%), порівняно невисоким (3,8...4,1) вмістом водню;

б) виплавка одношлаковим процесом з розкисленням металу силікокальцієм і вакуумуванням. У металі цього варіанту міститься невелика кількість кисню 0,0040% і азоту 0,0101% порівняно невисока концентрація водню 4,0...5,2;

в) виплавка двошлаковим процесом з розкисленням в ковші силікокальцієм; сталь містить мінімальну кількість сірки 0,008%, вміст азоту невисокий; концентрація водню 5,0...5,3 і кисню 0,0046 дещо підвищені.

Тож найбільш економічним та ефективним методом виробництва колісної сталі є виплавка сталі в електрометалургійних печах основним процесом за різними варіантами виплавки із застосуванням позапічних методів вакуумного рафінування, що значно підвищує якість колісної сталі.