МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

____Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки_____
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проєкт

_____другий (магістерський)_____
(рівень вищої освіти)

на тему_ **Фізико-хімічні особливості процесу зневуглецювання мартенівської ванни**_____
_____

Виконав: студент _II курсу, групи_8.1364-мчм
спеціальності _____136 Металургія_____
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Металургія чорних металів_
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
_____С.Ю.Фесенко_____
(ініціали та прізвище)

Керівник __доц., к.т.н., доц. Кириченко О.Г._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент_ проф., д.т.н., проф. Григор'єв С.М.___
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра____Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки____
Рівень вищої освіти_____другий (магістерський)_____
Спеціальність _____136 Металургія_____
(код та назва)
Освітня програма _____Металургія чорних металів_____
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри_____
«_____»_____20____року

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

_____Фесенку Станіславу Юрійовичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Фізико-хімічні особливості процесу зневуглецювання мартенівської ванни _____

керівник роботи _____Кириченко Олексій Геннадійович, к.т.н., доц._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «27»_лютого 2025___року №319-с_____

2 Строк подання студентом роботи _____08.12.2025_____

3 Вихідні дані до роботи __Дослідити фізико-хімічні особливості процесу зневуглецювання в умовах мартенівської печі_____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат; вступ; Аналітичний огляд літератури процесу окислення вуглецю; Методика проведення експериментів; Дослідження фізико-хімічних особливостей процесу зневуглецювання мартенівської ванни; 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
Аналітичний огляд літератури процесу окислення вуглецю	Кириченко О.Г., доцент		
Методика проведення експериментів	Кириченко О.Г., доцент		
Дослідження фізико-хімічних особливостей процесу зневуглецювання мартенівської ванни	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	21.11-25.11.2025	
2	Аналітичний огляд літератури процесу окислення вуглецю	26.11-30.11.2025	
3	Методика проведення експериментів	01.12-05.12.2025	
4	Дослідження фізико-хімічних особливостей процесу зневуглецювання мартенівської ванни	06.12-08.12.2025	
5	Охорона праці та техногенна безпека	09.12-13.12.2025	
6	Висновки, перелік джерел посилання	14.12.2025	

Студент _____ _____С.Ю. Фесенко_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ _____О.Г.Кириченко_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

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

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 103 с., 13 табл., 33 рис., 1 дод., 23 джерела

СТАЛЬ, ВУГЛЕЦЬ, КИСЕНЬ ОКИСЛЕННЯ, КОНЦЕНТРАЦІЯ, ЗНЕВУГЛЕЦЮВАННЯ, КІНЕТИКА, МАРТЕНІВСЬКИЙ ПРОЦЕС, РОЗПЛАВЛЕННЯ, КИПІННЯ

Об'єкт дослідження – процес виробництва сталей в стаціонарній мартенівській печі ємністю 250 та 500 т.

Предмет дослідження – закономірності і механізми фізико-хімічних процесів зневуглецювання ванни мартенівської печі та їх вплив на якість кінцевого продукту.

Мета роботи – дослідити фізико-хімічні особливості процесу окислення вуглецю в умовах мартенівської плавки з метою вдосконалення технології и можливості регулювання процесу.

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

Наукова новизна:

1. Досліджено, що під час кипіння металу в мартенівській печі за стандартних умов функціонування відбувається зміна ланки, яка обмежує процес. Коли концентрація вуглецю в металі перевищує критичний рівень, процес зневуглецювання залежить від масопереносу кисню. У випадках, коли вміст вуглецю менше критичного рівня, процес обмежується як масопереносом кисню, так і переміщенням вуглецю до зони реакції.

2. З'ясовано, що явище "самоприскорення" процесу зневуглецювання пов’язане зі зміною структури ближнього порядку в рідкому металі при концентрації вуглецю менше 0,5-0,4%. Крім того, це спричиняє зміну умов утворення та виділення нової фази — бульбашок CO. Варто враховувати, що при вмісті вуглецю <0,5% змінюються обставини зародження нової фази і з'являється нова

ланка, що лімітує процес — дифузія вуглецю, що впливає на швидкість окислення елементу.

3. Для інтенсивного й стабільного розвитку процесу зневуглецювання навіть при низьких концентраціях вуглецю рекомендовано забезпечити оптимальний перегрів металу над температурою ліквідус у межах 45-95 °С. Якщо перегрів становить менш ніж 45 °С, процес проходить нерівномірно. У разі надмірного перегріву (понад 90-100 °С) критичні концентрації вуглецю, при яких змінюється кінетика зневуглецювання, зростають з 0,20-0,29 до 0,30-0,40%, що передбачає передчасне згасання кипіння металу.

Практичне значення:

1. У лабораторних та виробничих умовах проведено дослідження технології мартенівської плавки та механізму зневуглецювання мартенівської ванни.
2. Визначено залежність режиму кипіння ванни, якості сталі й продуктивності мартенівських печей від вмісту вуглецю після розплавлення.
3. Досліджено вплив температури металу та швидкості зневуглецювання на темпи нагріву рідкої сталі.
4. У конкретних умовах цеху встановлено мінімальний запас вуглецю в металі після розплавлення, який складає 0,30-0,35%. Зменшення цього показника до зазначеного рівня дозволяє отримати сталь із низьким вмістом сірки, фосфору, неметалевих включень і високими механічними властивостями. Також це сприяє істотному скороченню витрат залізної руди, вапна і чавуну на плавку, підвищенню продуктивності мартенівських печей та зниженню собівартості сталі.

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

У розділі 1 приведений аналіз світового досвіду дослідження реакції окислення вуглецю; термодинаміка реакцій окислення вуглецю; механізм і кінетика окислення вуглецю; головні стадії і окремі ланки процесів і їх відносна швидкість; вміст кисню в металі при квазістаціонарному процесі зневуглецювання; критична концентрація вуглецю; фактори, що сприяють прискоренню вигоряння вуглецю.

У розділі 2 розроблено установку для дослідження кінетичних періодів і механізму окислення залізовуглецевих розплавів.

У розділі 3 розглянуті особливості кінетики процесу зневуглецювання мартенівської ванни; встановлені температурні умови процесу зневуглецювання та нагріву мартенівської ванни; досліджений вплив вмісту вуглецю по розплавленню на режим кипіння ванни, якість сталі і продуктивність мартенівських печей.

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

Зміст

Вступ 9
1 Аналітичний огляд літератури процесу окислення вуглецю 11
1.1 Аналіз світового досвіду дослідження реакції окислення вуглецю 11
1.2 Термодинаміка реакції окислення вуглецю 13
1.3 Механізм та кінетика окислення вуглецю 17
1.4 Головні стадії і окремі ланки процесів і їх відносна швидкість 21
1.5 Вміст кисню в металі при квазістаціонарному процесі зневуглецювання 26
1.6 Критична концентрація вуглецю 30
1.7 Чинники, що сприяють прискоренню вигоряння вуглецю 31
1.8 Прискорення вигорання вуглецю при низькому його вмісті в металі 32
2 Методика проведення експериментів 33
3 Дослідження фізико-хімічних особливостей процесу зневуглецювання мартенівської ванни 37
3.1 Особливості кінетики процесу зневуглецювання мартенівської ванни 37
3.2 Температурні умови процесу зневуглецювання та нагріву мартенівської ванни 45
3.2.1 Вплив перегріву металу над ліквідусом на швидкість окислення вуглецю в мартенівській ванні 46
3.2.2 Вплив температури металу на швидкість нагріву рідкої сталі 50
3.2.3 Вплив швидкості зневуглецювання на швидкість нагріву металу 54
3.3 Вплив вмісту вуглецю по розплавленню на режим кипіння ванни, якість сталі і продуктивність мартенівських печей 57
3.1.1 Методика проведення дослідження 57
3.3.2 Результати статистичного аналізу якості та технології виплавки плавок 59
3.3.3 Результати дослідних плавок 68
4 Охорона праці та техногенна безпека 81
4.1 Аналіз потенційно шкідливих и небезпечних чинників у сталеплавильній лабораторії мартенівського цеху 81
4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних и шкідливих

чинників виробничого середовища 83
4.3 Заходи з електробезпеки 84
4.4 Заходи пожежної безпеки 85
4.5 Технічні рішення виробничої санітарії 87
4.5.1 Опалення та вентиляція цеху 87
4.5.2 Освітлення виробничих приміщень 88
4.5.3 Санітарно-побутові приміщення 89
4.5.4 Виробничий шум 90
4.5.5 Засоби індивідуального захисту 91
4.6 Розрахунок межі вогнестійкості суцільних конструкцій під одностороннім обігрівом (з урахуванням прогріву) 92
Висновки 95
Перелік джерел посилання 97
Додаток А Публікації за темою кваліфікаційної роботи 99

Вступ

Сучасний розвиток вітчизняної металургійної промисловості характеризується постійним удосконаленням технологічних процесів, спрямованих на покращення якості продукції та розширення асортименту металовиробів, які відповідають вимогам ринкової економіки. Водночас функціонування існуючих технологій потребує пильної уваги, їх вивчення та вдосконалення.

Однією з ключових реакцій сталеплавильних процесів є реакція окислення вуглецю. Вуглець виступає основним споживачем кисню, який вводиться в металургійну ванну для окислення домішок. У мартенівському процесі на окислення вуглецю припадає понад 80% загальної витрати кисню. Під час такого процесу кипіння сталі, викликаного утворенням газоподібних продуктів реакції (CO і CO_2) та їх переміщенням через шлак і метал, забезпечується ефективне перемішування металургійної ванни і прискорюються тепло- і масообмінні процеси. Газоподібні продукти реакції значно перевищують за обсягом матеріал, що плавиться.

Реакція окислення вуглецю в умовах мартенівського виробництва має вирішальне значення, тому контроль за плавкою здебільшого зводиться до регулювання процесів зневуглецювання ванни. Метою цієї роботи є дослідження фізико-хімічних особливостей реакції окислення вуглецю, що проходить у мартенівський печі, з акцентом на вдосконалення технологічного процесу та оптимізацію регулювання його параметрів.

Основним завданням дослідження є проведення глибокого фізико-хімічного аналізу, використання сучасних досягнень у галузі металургійної науки для розробки техногенних основ управління процесом окислення вуглецю. Це безпосередньо сприятиме покращенню якості сталі й прогнозуванню її кінцевого хімічного складу. Для досягнення поставленої мети застосовуються сучасні методи аналізу та експериментальні підходи.

У межах виконання роботи були поставлені наступні завдання:

1. Визначити реальну динаміку зміни швидкості окислення вуглецю протягом періоду активного кипіння.

2. Установити залежності між температурою металу і швидкістю зневуглецювання, які гарантують отримання якісної сталі за умови максимальної інтенсифікації процесу.

3. Провести статистичний аналіз промислових плавок.

4. З'ясувати причини перепризначення плавок.

5. Визначити тривалість періоду кипіння залежно від вмісту вуглецю та швидкості його окислення.

6. Розробити обґрунтовані співвідношення між температурою металу та швидкістю зневуглецювання, що дозволяють отримати метал високої якості за умов інтенсифікованого процесу.

7. Визначити мінімально допустимий вміст вуглецю у металі після завершення розплавлення.

Виконання зазначених завдань стане основою для технологічного вдосконалення мартенівських плавок та забезпечення їхньої високої ефективності й продуктивності.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ПРОЦЕСУ ОКИСЛЕННЯ ВУГЛЕЦЮ

1.1 Аналіз світового досвіду дослідження реакції окислення вуглецю

Вуглець є найважливішою домішкою металу. Він грає величезну позитивну роль в сталеплавильних процесах. Розширюючи область температур стійкого стану γ-Fe і покращуючи властивості заліза, вуглець дозволяє отримувати сталь з широким діапазоном механічних властивостей.

Реакцію окислення вуглецю справедливо називають основною реакцією сталеплавильних процесів. Вуглець є головним споживачем кисню, що підводиться в ванну для окислення домішок. У мартенівському процесі до 80% і більше сумарної витрати кисню доводиться на окислення вуглецю.

Кипіння сталі, обумовлене виділенням газоподібних продуктів реакції і Спливання їх через товщу шлаку і металу, забезпечує перемішування ванни і прискорює всі тепло і масообмінні процеси. При окисленні вуглецю утворюються CO та CO_2, обсяг яких в тисячі разів перевищує обсяг металу.

Бульбашки CO, проходячи через рідкий метал, сприяють видаленню газів і неметалевих включень.

Важливе значення в кисневих процесах має нагрівання ванни теплом, що виділяється при окисленні вуглецю. Наприклад, в киснево-конвертерному процесі тепло реакції окислення вуглецю становить 20-25% від загального теплового балансу плавки.

У сучасних високопродуктивних сталеплавильних процесах металева шихта містить 70-80% чавуну (3,0-3,5% C). Тривалість плавки і продуктивність агрегату визначаються, насамперед, швидкістю видалення вуглецю з металу. Режим зневуглецювання ванни визначає і ряд якісних показників сталеплавильних процесів: вихід придатного, окисленність металу і наявність в ньому неметалевих включень, швидкість шлакоутворення, що впливає на ступінь видалення шкідливих домішок з металу.

Реакція окислення вуглецю в мартенівському переділі настільки важлива, що управління плавкою в першу чергу зводиться до процесів, пов'язаних з зневуглецюванням ванни.

Окислення вуглецю, розчиненого в розплавах на основі заліза, має найбільшого практичного значення в сучасній металургії сталі. У всіх випадках, починаючи з плавки в кисневих конверторах з використанням скрапу і кінчаючи "переплавом" в дугових печах, доводиться пов'язувати значення середніх концентрацій вуглецю в шихті з тим часом, який необхідний для повного розплавлення скрапу, формування гомогенного шлаку і нагрівання металевої ванни до температури, необхідної для її розкислення, легування і успішного розливання. Протягом усього цього часу з газової фази в метал безперервно надходить кисень і, для запобігання його накопичення в металі, підтримки [O] на відносно низькому рівні і зменшення чаду металу в шлак, необхідна присутність в металі дешевого і що має високу спорідненість до кисню елемента. У більшості випадків таким елементом є вуглець. При [C]≥0,2% вуглець строго контролює концентрацію кисню, що залишається в розчині в металі, і в цьому відношенні є необхідним елементом.

Однак цим далеко не вичерпується корисна роль вуглецю. Справа в тому, що вуглець є єдиним елементом металевої ванни, що дає в звичайних умовах плавки газоподібний продукт окислення - {CO} - або, при низьких [C], суміші {CO} і $\{CO_2\}$. Виділення цих газоподібних продуктів також грає велику практичну роль. Воно, як відомо, визначає: інтенсивність перемішування розплавленого металу і, отже, швидкість вирівнювання його складу і хімічних взаємодій, а також швидкість теплопереносу всередині металу, тобто швидкість прогрівання та вирівнювання температури металу у всьому його обсязі. Зародження і спливання в обсязі металів бульбашок CO призводить до часткового переходу в них, відповідно до закону Генрі, розчинених в металі водню та азоту. Крім того, спливання бульбашок {CO} полегшує флотування на них зважених в металі неметалічних включень і асиміляції їх шлаком.

1.2 Термодинаміка реакцій окислення вуглецю

Окислення вуглецю в сталі протікає за двома основними реакціями:

1) [C] + [O] = {CO};

2) [C] + 2 [O] = $\{CO_2\}$.

Друга реакція має значення лише при [% C] менше 0,05 мас., %, а при [% C] ≥ 0,1 мас. часткою, % практично не протікає (P_{co_2} в суміші газів CO + CO_2 складає при 1600 °C менш $2 \cdot 10^3$ Па)

За даними Фува і Чіпмен, для реакції (1)

$$\Delta G_T^0 = -22350 - 36{,}63\, Дж / моль;$$
$$\lg K_c = \lg \frac{P_{co_2}}{[\%C][\%O]\gamma_c\gamma_o} = \frac{1168}{T} + 2{,}07. \qquad (1.1)$$

Часто користуються величиною

$$m = \frac{1}{K_c\gamma_c\gamma_o} = -\frac{[\%C][\%O]}{P_{co}}., \qquad (1.2)$$

в наближенні можна вважати, що $\gamma_c\gamma_o \approx 1$ (в межах [%C] від 0,02 до 2,0 мас. часток, %) і що $m \approx 1/K_c$.

Значення K_c і m мало міняються з температурою, що обумовлено малим тепловим ефектом реакції. При 1600 тепловий ефект реакції (1) менше теплового ефекту окислення розчиненого в ванні вуглецю газоподібним киснем. Це обумовлено тим, що при розчиненні газоподібного кисню в залозі виділяється велика кількість теплоти.

При 1600 °C

$$[C] + \frac{1}{2}\{O_2\} = \{CO\};\quad Q = -\Delta H = +139{,}7\ кДж / моль;$$
$$[O] = \frac{1}{2}\{O_2\};\quad Q = -\Delta H = -117{,}3\, кДж / моль.$$

Сумарно за законом Гесса - [C] + [O] = {CO};.ΔQ = H = + 22,4 кДж / моль.

Малий тепловий ефект реакції у ванні відноситься лише до одного з ланок процесу, і було б помилкою вважати, що окислення вуглецю киснем дає мало теплоти" (таку помилку часто допускають). Якщо розглянути сумарну реакцію окислення розчинених у ванні вуглецю газоподібним киснем, то її тепловий

ефект значний (139,7 кДж/моль). Це і є основою інтенсифікації процесу при заміні твердого окислювача (залізної руди, окалини) газоподібним киснем. На розкладання руди, нагрів заліза і кисню і на плавлення заліза витрачається багато теплоти:

$$\underset{0^0C}{\frac{1}{3}Fe_2O_3} = \underset{1600^0C}{\frac{2}{3}Fe_{ж}} + \underset{1600^0C}{\frac{1}{2}O_2} - 349{,}6\ кДж,$$

тому

$$\underset{1600^0C}{[C]} + \underset{0^0C}{\frac{1}{3}Fe_2O_3} = \underset{1600^0C}{\{CO\}} + \underset{1600^0C}{\frac{2}{3}Fe} = 210{,}2\ кДж.$$

При окисленні 1 т вуглецю у ванні гарячим киснем ванна набуває (139,7:12)10^6≈11,6 ГДж теплоти. При окисленні 1 т вуглецю рудою ванна втрачає (210,2:12)10^6≈17,6 ГДж теплоти. Різниця становить близько 30 ГДж на 1 т окисленого вуглецю.

До останнього часу вважали, що з ростом [% C] падає добуток коефіцієнтів активності $\gamma_c\gamma_o$. За останні роки це питання уточнено. За даними Фува, Тасуку і Чіпмен (1961 р.), з ростом [% C] $\gamma_c\gamma_o$ навіть дещо збільшується (у всякому разі не падає в межах [% C] = 0,02 ... 2,0 мас. часток, %). Уточнена також величина m = 0,0020. Раніше на основі досліджень Вечера і Гамільтона (1931 р.) вважали, що при [C] = 1,0 мас. часток, % $\gamma_c\gamma_o$ = 0,55, а при [C] = 2,0 мас. часток,% $\gamma_c\gamma_o$ = 0,31 (дані в безперервному падінні $\gamma_c\gamma_o$ з ростом [% C]), виявилися неточними.

Концентрація кисню в сталі при рівновазі з бульбашкою оксиду вуглецю

$$[\%O]_{P.C} = \frac{mP_{co}}{[\%C]} = \frac{P_{co}10^{-5}}{K_{co}[C]}. \qquad (1.3)$$

Коефіцієнт 10^{-5} враховує перерахунок тиску атмосфери на паскаль.

Парціальний тиск CO в бульбашках приблизно дорівнює загальному тиску в них, тобто зовнішньому тиску на бульбашки (якщо знехтувати $P_{N_2}, P_{H_2}, P_{CO_2}$), Па:

$$P_{CO} \approx P_{внеш} = P_{атм} + \left(H_{\mu}\rho_{\mu} + H_{ш}\rho_{ш} \right) g + \frac{2\sigma}{r}, \tag{1.4}$$

де $P_{атм} \approx 10^5$ Па - атмосферний тиск; H_{μ} і $H_{ш}$ - висота шару відповідно металу і шлаку над бульбашками, м; ρ_{μ} и $\rho_{ш}$ - щільність відповідно металу (~7000кг/м^3) і шлаку (~3000 кг/м^3); g = 9,81 м/с^2 - прискорення сили тяжіння; σ - поверхневий натяг рідкої сталі (1,0...1,3 Н/м, или 1000...1300 мДж/м^2); r - радіус бульбашки, м; $\frac{2\sigma}{r}$ - капілярний тиск (формула Лапласа), Н/м^2.

При радіусі бульбашки $r \geq 10^{-3}$ м (≥1 мм) можна знехтувати значенням $\frac{2\sigma}{r} \leq 2600$ Па. При $H_{ш} \leq 0{,}15$ м можна знехтувати і значенням $H_{ш}\rho_{ш}g \leq 4500$ Па. Тому в практичних розрахунках з урахуванням рівняння

$$P_{CO} \approx 10^5 + H_{\mu}\rho_{\mu}g; \tag{1.5}$$

$$[\%O]_{P.C} \approx \frac{m\left(10^5 + H_{\mu}\rho_{\mu}g\right)}{[\%C]}. \tag{1.6}$$

Найбільша концентрація $[\%O]_{P.C}$ повинна бути в шарі металу, що прилягає до поду печі, де $H_{\mu}=H_{max}$ дорівнює глибині ванни. У верхньому шарі металу, де $H_{\mu}=0$,

$$[\%O]_{P.C} \approx \frac{m}{[\%C]} \approx \frac{0{,}0020}{[\%C]}. \tag{1.7}$$

Фактична [% O] в верхніх шарах металу більше, ніж в нижніх, так як кисень надходить в ванну зверху вниз.

У найтоншому шарі металу, що прилягає до шлаку (в прикордонному дифузійному шарі з боку шлаку) $[\%O]=[\%O]_{P.C}$ дорівнює рівноважному вмістом кисню за умовами розподілу між металом і шлаком.

При рівновазі зі шлаком

$$[\%O]_{P.ù} = a_{(FeO)}L_0 = (\%FeO)\gamma_{(FeO)}L_0. \tag{1.8}$$

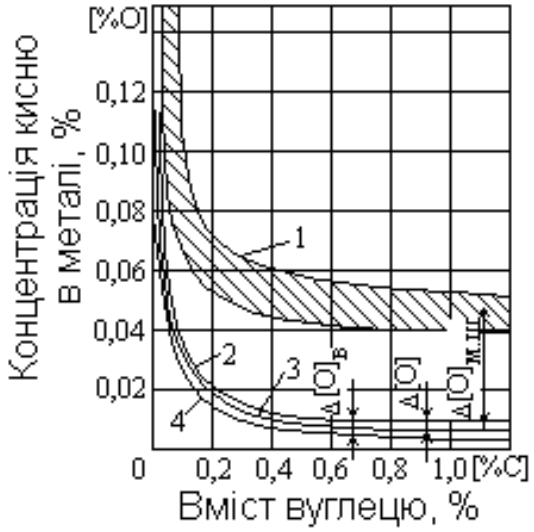
Коефіцієнт розподілу кисню L_0 при різній температурі можна визначити графічно.

Вміст кисню в металі при рівновазі зі шлаком значно більше, ніж при рівновазі з вуглецем (при [%*C*]≥0,2 мас. часток, %). Так, при (%*FeO*)=12 мас. часток, %, $\gamma_{(FeO)}$=3,0 (при основності шлаку *B*=2,0), L_0=0,0023 (при 1600°С), [%*O*]=12·3·0,0023=0,082 мас. часток, %.

При [%*C*]=0,2 мас. часток, %, P_{CO}=1,3·10^5 Па (в середніх шарах металу) и K_C=500,

$$[\%O]_{P.C} = \frac{P_{CO}10^{-5}}{K_C[\%C]} = \frac{1{,}3}{500 \cdot 0{,}2} = 0{,}013\,\text{масс.долей},\% \qquad (1.9)$$

Фактична концентрація кисню в металі [%*O*] значно менше рівноважної зі шлаком, але дещо більше рівноважної з вуглецем (рис. 1.1) на величину $\Delta[O]$, необхідну для подолання дифузійного опору металу при перенесенні кисню з обсягу до поверхні бульбашок СО:



1 - максимально можливі при рівновазі металу зі шлаком $[\%O]_{р.ш.}=a_{(FeO)}L_0$;

2 - фактичні в ванні великих печей в період чистого кипіння;

3, 4 - в умовах рівноваги з вуглецем відповідно при P_{CO}=0,15 и P_{CO}=0,1 МПа

Рисунок 1.1 – Вплив вмісту вуглецю на концентрацію кисню в металі

$$\Delta[O]_{м} = [\%O]_{р} - [\%O];$$
$$\Delta[O] = [\%O] - [\%O]_{P.C};$$
$$\Delta[O]_{м} \rangle\rangle \Delta[O]. \qquad (1.10)$$

Хімічний потенціал кисню в шлаку під час кипіння ванни набагато більше, ніж в металі. Хімічний потенціал кисню в металі незначно більше, ніж у поверхні бульбашок СО.

1.3 Механізм та кінетика окислення вуглецю

За сучасними поглядами, зародження бульбашок вуглецю всередині гомогенного рідкого металу або на його кордоні з гомогенним шлаком неймовірно через малий радіус "дирок" в металі - близько 0,1 нм (10^{-8} см). Якщо припустити, що в результаті флуктуацій утворюється зародок радіуса r=1 нм (10^{-7} см), то капілярний тиск буде величезним: при σ=1000 мДж/м^2=1 Н/м; r=10^{-9} м (1 нм), $2\sigma/r$=$2\cdot10^9$ Па.

Очевидно, що для стійкого існування і зростання зародків бульбашок СО повинні мати значно більші розміри. Розрахунки показали, що навіть при термодинамічному пересиченні системи метал - газ близько 8,0 і сумарному тиску атмосфери, металу і шлаку P_0=1,35·10^5 Па стійкий (критичний) радіус бульбашки $r_{кр}$=0,8·10^{-5} м. Але при цьому число молекул в бульбашці становить 4,16·10^{10}. Мимовільне здійснення такої події малоймовірно, тому що вимагає одноразової концентрації величезної кількості атомів вуглецю і кисню в малому обсязі.

Робота утворення зародка критичного розміру

$$\Delta G_{кр} = \frac{4\pi r_{кр}^2 \sigma}{3}. \qquad (1.11)$$

Імовірність флуктуації ізобарного потенціалу системи на величину $\Delta G_{кр}$

$$P = Ae^{-\frac{\Delta G_{кр}}{KT}}, \qquad (1.12)$$

де A – наближено дорівнює загальній кількості молекул в зародку; K – постійна Больцмана (K=R/N_A=1,38·10^{-23} Дж/К).

За розрахунками при $r_{кр}$=0,8·10^{-5} м и σ=1500 мДж/м^2 $e^{\left\{-\frac{\Delta G_{\text{.}\delta}}{KT}\right\}} = 10^{-6,7\cdot10^{11}}$, тобто ймовірність утворення зародка критичного розміру при порівняно сприятливих умовах (пересичені, рівному 8) близька до нуля.

Пересичення сталеплавильної ванни щодо СО зазвичай невелике. За даними ряду досліджень, концентрація вуглецю і кисню в металі такі, що вони здатні перебувати в рівновазі з газоподібною СО на плоскій поверхні розділу фаз (при r=∞) що має тиск:

$$P^0_{CO\infty} = 10^5 [\%C][\%O] K_C = (1{,}5...5{,}0)10^5 \; Па \tag{1.13}$$

Наявність увігнутої поверхні розділу металу з бульбашкою, що має радіус r, зменшує "тиск виділення" СО (тиск в газовій фазі $P^0_{CO,r}$ при рівновазі з розплавом), тобто ускладнює виділення СО в порівнянні з плоскою поверхнею розділу фаз. Це зменшення можна розрахувати за рівнянням Томсона:

$$\ln P^0_{CO,r} = \ln P^0_{CO,\infty} - \frac{2\sigma M_{CO}}{r\rho_{CO} RT}, \tag{1.14}$$

де M_{CO}=28 - молекулярна маса CO; ρ_{CO} - щільність газу; R=8,313 Дж/(моль·К).

Отже, при рівновазі розплаву з бульбашкою радіуса r "тиск виділення" СО, розрахований для плоскої поверхні розділу, має бути трохи вище фактичного тиску в бульбашці:

$$P_{CO,r} = P_0 + \frac{2\sigma}{r} = P^0_{CO,r} \tag{1.14}$$

де P_0 - тиск атмосфери, шару металу і шлаку.

$$\ln P^0_{CO,\infty} = \ln\left([\%C][\%O]K_C\right) = \ln\left(P_0 + \frac{2\sigma}{r}\right) + \frac{2\sigma M_{CO}}{r\rho_{CO} RT}. \tag{1.15}$$

На підставі цього рівняння можна розрахувати критичний (стійкий) розмір бульбашки.

Необхідно відзначити, що в деяких роботах в розрахунках за формулою Томсона помилково приймають щільність СО при нормальних умовах (без урахування впливу температури і тиску на щільність газу).

На основі рівняння Клапейрона для 1 моль газу

$$P\nu = P\frac{M}{\rho} = RT;\frac{M_{CO}}{\rho_{CO}} = \frac{RT}{P_0 + \frac{2\sigma}{r}}. \qquad (1.16)$$

Визначення $r_{крит}$ по рівняннях можливо лише графічно (через неявності функції).

Для цього на графіку (рис. 1.2) будують дві криві, одна з яких показує зменшення $P_{CO,r} = P_0 + \frac{2\sigma}{r}$, а інша - збільшення $P^0_{CO,r}$ з ростом радіуса бульбашки r при заданому значенні $P^0_{CO,\infty}$. Точка перетину цих кривих відповідає критичним розмірами бульбашки (механічної і хімічної його стійкості [2]).



Рисунок 1.2 – Вплив радіусу бульбашки на тиск виділення $P^{\circ}_{CO,r}$ та фактичний тиск в бульбашці $P_{CO,r} = P_0 + \frac{2\sigma}{r}$ (P_0=1,3·10^5 Па; σ=1,2Дж/м^2; $P^{\circ}_{CO,\infty}$ = 10·10^5 Па)

Необхідний добуток [%C][%O] = $P_{CO,\infty}\cdot 10^{-5}/K_C$ = 1,72/500=0,00344. В порівнянні з $P_{CO,\infty}$ =10^5 Па метал “пересичений” в 1,72 рази.

Аналогічний розрахунок показує, що при $r_{крит}$=10^{-5} м ступінь пересичення металу складе близько 8, що вже само по собі рідкісне явище в сталеплавильних ваннах. Однак, як було показано, ймовірність флуктуацій в розчині для утворення навіть такої малої бульбашки близька до нуля.

Якщо розглянути найбільш ймовірні флуктуації енергії і маси в розчині (утворення зародка радіусу 10^{-9} м), то $P_{CO,r}$ складе близько $2 \cdot 10^9$ Па, а $P_{CO,\infty}$ - близько $4{,}6 \cdot 10^9$ Па , що взагалі неймовірно.

З викладеного випливає, що зародження бульбашок CO можливо лише на шорсткій твердій поверхні, тобто в порах подини, де є не змочені металом поглиблення (0,1 ... 1,0 мм), заповнені газом. Якщо подина ошлакована, "кипіння" ванни ускладнено.

При спливанні бульбашок усувається утруднення виділення CO з розплаву, так як на поверхні готових бульбашок, що мають радіус більше критичного, реакція можлива. Тому, хоча спочатку зародження бульбашок можливо тільки на подині, в кінцевому підсумку реакція $[C] \rightarrow \{CO\}$ протікає у всьому обсязі металу і навіть більш енергійно в верхніх шарах металу. Останнє обумовлено тим, що при спливанні бульбашки безперервно збільшуються його обсяг і поверхня (через збільшення маси бульбашки і зменшення тиску стовпа металу) і зростає зверхрівноважний вміст кисню:

$$\Delta[O] = [\%O] - [\%O]_{\text{р.}c} = [\%O] - \frac{m\left(10^5 + H_\mu \rho_\mu g\right)}{[\%C]}. \qquad (1.17)$$

У кожному горизонті ванни швидкість вигоряння вуглецю (V_c, %/С) залежить від швидкості дифузії кисню з обсягу металу до поверхні бульбашок:

$$V_c = \frac{12}{16} \beta_0 \left\{ [\%O] - [\%O]_{\text{р.}c} \right\} \frac{S_м}{V_\mu}, \qquad (1.18)$$

де β_0 - коефіцієнт масопереносу кисню, м/с;

$\frac{S_м}{V_\mu}$ - відношення площі поверхні бульбашок до обсягу металу, $м^2/м^3$.

У деяких випадках можливе поверхневе кипіння, тобто зародження бульбашок CO на кордоні металу зі шлаком при наявності в шлаку твердих шматочків руди, вапна з заглибленнями більше $r_{крит}$.

Характерними ознаками такого кипіння служить виділення дрібних бульбашок, які не встигають укрупнюватися при проходженні тонкого шару металу, і спінений стан шлаку (дрібні бульбашки повільно спливають).

При вдуванні повітря або кисню в ванну вводяться готові зародки газової фази, і кипіння ванни можливо в місцях введення окисного газу без попереднього утворення зародків на поді. Однак і в цьому випадку роль "подового кипіння" величезна, так як поверхня бульбашок газу, що вдувається, не забезпечує повного використання кисню на реакцію і значна його частина за рахунок турбулентної дифузії переноситься в обсяг металу, доходить до футерування ванни, де утворюються додаткові бульбашки, інтенсивно ростуть при спливанні вгору.

1.4 Головні стадії і окремі ланки процесів і їх відносна швидкість

Основні стадії процесу зневуглецювання сталі наступні.

1. Перехід кисню з окислювальної газової фази в шлак:

а) дифузія в газі;

б) адсорбція кисню на поверхні шлаку;

в) хімічна реакція на поверхні газ-шлак з утворенням феритів ($CaO \cdot Fe_2O_3$; $FeO \cdot Fe_2O_3$;) чи іонів FeO_2^{1-};

г) дифузія феритів (іонів FeO_2^{1-}) до межі шлак-метал;

д) хімічна реакція утворення оксиду заліза (II) на межі шлак-метал;

е) дифузія FeO з нижніх шарів шлаку до межі шлак-газ.

2. Перехід кисню з шлаку в метал:

а) перехід FeO в пограничний шар метал-шлак і хімічний акт її розпаду на атоми $(FeO)_{ш.м}=[Fe]_{м.ш}+[O]_{м.ш}$;

б) молекулярна дифузія кисню через пограничний шар метал-шлак в основну масу металу $[O]_{м.ш} \rightarrow [O]$;

в) турбулентна дифузія кисню в об'ємі металу;

г) молекулярна дифузія кисню і вуглецю в пограничному шарі метал-бульбашка $[O] \rightarrow [O]_{м.п}$; $[C] \rightarrow [C]_{м.п}$;

д) адсорбція кисню і вуглецю на поверхні бульбашок.

3. Хімічна реакція на поверхні бульбашок

$$[C]_{адс}+[O]_{адс}=[CO]_{адс}.$$

4. Виділення (десорбція) С у бульбашки, ріст бульбашок і їх спливання через метал і шлак в атмосферу печі :

$$\text{а) } [CO]_{\text{адс}} \rightarrow \{CO\}_{\text{пуз}};$$

$$\text{б) } [CO]_{\text{пуз}} \rightarrow \{CO\}_{\text{отм. печи}}.$$

При продуванні металу киснем або повітрям процес має ті ж ланки, що і при мартенівському способі виплавки сталі, але їх швидкість різко збільшується за рахунок потужнішого перемішування фаз (збільшуються β і S) і наближення до металу зони з високим хімічним потенціалом кисню.

Екзотермічність реакцій і швидкий підйом температури металу і шлаку також сприяють прискоренню усіх дифузійних ланок і процесу в цілому.

Роль корольків (капіж) металу в шлаку величезна. Це своєрідні "мікрованни", в які кисень переходить з газу і шлаку по описаному механізму. Поверхня контакту корольків з металом дуже велика. Якщо в мартенівській печі відношення площі поверхні шлаку до маси металу складає 0,2…0,4 м^2/т, то в корольку діаметром 0,3 мм вона складає $G/r\rho_{\mu}=6/3\cdot10^{-4}\cdot7000=2860$ м^2/т, тобто в 7500-14300 разів більше.

З цієї причини швидкість вигорання вуглецю, розрахована нами по найбільш повільній ланці (дифузія кисню в пограничному шарі метал-шлак)

$$V_c = 0{,}75\beta_0 \left\{a_{(FeO)}L_0 - [\%O]\right\}\frac{S}{V\mu} \qquad (1.19)$$

перевищує 10 мас. часток, % С/хв., що на 3 порядки більше, ніж в мартенівській ванні і на 1-2 порядки більше, ніж в конвертерній ванні.

Дослідження показали, що в корольках [%С] приблизно у 2 рази менше, ніж в металі. Час їх перебування в шлаку (перед складає декілька секунд, оскільки за рахунок конвективних потоків корольки швидко повертаються в метал. З деяким запасом можна прийняти $\tau_{пред}$=10 с (спрощене вичислення за формулою Стоксу; точніше - дослідження на моделі). При кількості окисленого вуглецю в корольку [C]=0,5 мас. часток, % V_C = 3 мас. часток, С/хв., що на 1 порядок більше, ніж в конвертері.

Велика V_c в корольках підтвердилася за останні роки при струминному рафінуванні, де за рахунок того, що при розпилянні рідкого чавуну киснем забезпечується окислення домішок в краплях за декілька секунд.

При використанні в якості кисню залізняку змінюється лише перша стадія процесу, на початку якого відбувається нагрів і розплавлення руди в нижніх шарах шлаку і відновлення Fe_2O_3 до FeO по реакції $(FeO)+[Fe]=3(FeO)$. Далі протікають усі описані ланки процесу.

Дія руди, що охолоджує, украй обмежує інтенсифікацію процесу. Присадка 1% руди охолоджує метал ~ на 30°С; 1 т руди віднімає від металу більше 4 ГДж теплоти.

Руда – концентрований окисник. У розплавленій руді хімічний потенціал кисню на 1-2 порядки більший, ніж в газоподібному кисні. Проте ефективність застосування залізняку лімітується швидкістю підведення теплоти у ванну.

Аналіз відносних швидкостей окремих ланок процесу зневуглецювання металу дозволив виявити ряд закономірностей.

Найбільш повільними являються дифузійні ланки. Це підтверджується малим значенням енергії активізації процесу.

Було досліджено 400 плавок в 190-т і 380-т мартенівських печах. Встановлено, що за інших рівних умов підвищення температури металу на 100°С (з 1480 до 1580°С) забезпечило збільшення V_c в 1,3-1,4 разу. Уявна енергія активація процесу зневуглецювання сталі, розрахована по рівнянню $E = \frac{2{,}303B\lg 1{,}4}{\frac{1}{1753}-\frac{1}{1853}} = 96{,}3$ кДж/моль. Така невелика величина Е характерна для дифузійної області. Ще менше значення Е отримане при продуванні ванни повітрям (~12,6 кДж/моль).

Хімічні стадії процесу не лімітують його швидкість. Це підтвердилося відсутністю залежності між [%С] і V_c при концентрації вище за "критичну", що становить 0,2-0,3 мас. часток, %С, а також малою енергією активації процесу.

Якби хімічна реакція лімітувала процес, то за законом діючих мас і швидкість вигорання вуглецю була б пропорційною [%С] або спостерігалося б збільшення Δ[%О] при зменшенні [%С] і при постійній V_c. Рівняння, запропоноване Г. Шенком, не підтвердилося на практиці.

$$V_c = K_1[\%C][\%O] - K_2 P_{co} = K_1[\%C]\Delta[\%O] \qquad (1.20)$$

Дослідні дані (рисунок 1.3, 1.4) показали, що швидкість вигорання вуглецю:

а) не залежить від [%C] (при [C]>0,3 мас. часток, %);

б) росте зі збільшенням відношення площі дзеркала ванни до маси металу (S/M, м^2/т), тобто з підвищенням інтенсивності вступу кисню з газової фази на одиницю металу;

в) росте зі збільшенням витрати руди в одиницю часу (при збереженні нормального перегрівання металу).



а - безрудне кипіння при 1570..1610^{0}С;

б - за даними усіх проб періоду чистого кипіння;

1 - 190-т мартенівські печі; 2 - 380-т печі (цифри у точок - кількість плавок)

Рисунок 1.3 – Залежність V_c в період чистого кипіння від [%C]

Дані нових досліджень показали, що при продуванні мартенівської і конвертерної ванн киснем (раніше було встановлено, що і при продуванні повітрям) V_c прямо пропорційна інтенсивності продування ванни.

Таким чином, можна вважати встановленим, що процес зневуглецювання сталі лімітується швидкістю введення кисню у ванну.



1 - V_c за рахунок кисню атмосфери печі; 2 - за рахунок кисню руди (близько 16% С на 1% руди). Цифри у точок - кількість плавок

Рисунок 1.4 – Залежність V_c у ванні 380-т мартенівської печі на початку рудного кипіння від витрати залізняку $G_р$

З дифузійних ланок процесу найбільш повільні дифузії кисню в пограничних шарах газ-шлак і шлак-метал і в об'ємі шлаку. У об'ємі металу і пограничних шарах метал - бульбашки під час кипіння ванни дифузія протікає дуже швидко із-за енергійного перемішування металу і внаслідок великої сумарної поверхні бульбашок, яка за нашими розрахунками в 10-12 разів більше, ніж поверхня розділу газ-шлак і шлак-метал. З цієї причини перепад концентрацій кисню в металі $\Delta[O]=[\%O]-[\%O]_{р.п}$ у декілька разів менше, ніж перепад на межі шлак-метал:

$$[\%O]_{м.ш}=[\%O]_{р.ш}-[\%O]=a_{(FeO)}L_0-[\%O].$$

Повністю нехтувати дифузійним опором металу не слідує, оскільки воно сумірно з дифузійним опором газу і шлаку. При високій інтенсивності перемішування газу і шлаку, коли зменшується їх дифузійний опір, збільшується доля опорів в металі, що при високій інтенсивності підведення кисню в метал виражається в деякому збільшенні $\Delta[O]$.

1.5 Вміст кисню в металі при квазістаціонарному процесі зневуглецювання

У мартенівській ванні в період чистого кипіння, а в конвертері в другий період продування V_c приблизно постійна, прихід кисню у ванну приблизно дорівнює його витраті на окислення вуглецю, не спостерігається значна зміна концентрацій (FeO) і [%O]. Подібні процеси називаються квазістаціонарними.

При постійній V_c можна вичислити [%O] виходячи з рівності швидкостей окремих ланок по запропонованому рівнянню. Якщо, наприклад, прирівняти швидкість дифузії кисню з поверхневого шару метал-шлак в об'єм металу і з об'єму металу до поверхні бульбашок, то, %/с

$$V_{O_2} = K_1\left\{a_{(FeO)}L_0 - [\%O]\right\} = K_2\left\{[\%O] - \frac{P_{co}\cdot 10^5}{K_c[\%C]}\right\}, \qquad (1.21)$$

де $K_1=\beta_{\mu ш}S_{м.ш}/V_м$ 1/с; $K_2=\beta_{\mu n}S_{м.n}/V_м$, 1/с; $K_c\approx 500$ - константа рівноваги реакції $[C]+[O]=\{CO\}$; V_μ - об'єм металу, м^3; $\beta_{\mu n}$, $\beta_{\mu ш}$ - коефіцієнти масопереносу кисню поблизу шлаку і поблизу бульбашок CO, м/с; $S_{м.ш}$, $S_{м.n}$ - сумарна площа поверхні контакту металу з шлаком і бульбашками CO, м^2.

Знаходимо [%O]

$$[\%O] = \frac{a_{(FeO)}L_0}{1+K_2/K_1} + \frac{P_{co}\cdot 10^{-5}}{K_c[\%C]\left(1+K_1/K_2\right)}. \qquad (1.22)$$

Розглянемо два крайні випадки.

1. $K_1 >> K_2$, тобто константа швидкості дифузії кисню з шлаку в метал (добуток коефіцієнта масопереносу на питому поверхню розділу) несумірно більше, ніж константа швидкості дифузії з металу до бульбашок CO. В цьому випадку $[\%O]\approx a_{(FeO)}L_0$. Метал по кисню близький до рівноваги з шлаком.

2. $K_2 >> K_1$, $[\%O]\approx\frac{P_{co}\cdot 10^{-5}}{K_c[\%C]}$. Метал по кисню близький до рівноваги з бульбашками CO. Насправді маємо проміжне положення, але [%C] ближче до рівноваги з бульбашками CO, чим з шлаком.

Дослідження показали, що у ванні при [%C]>0,3 мас. часток, %:

$$[\%O] \approx 0{,}1 a_{(FeO)} L_0 + \frac{0{,}0032}{[\%C]} - 0{,}0014. \tag{1.23}$$

Це означає, що $1+\frac{K_2}{K_1} \approx 10; \frac{K_2}{K_1} \approx 9.$

Якщо приблизно вважати, що $\beta_{\mu n}$ і $\beta_{\mu ш}$ - величини одного порядку, то сумарна поверхня бульбашок CO на один порядок більше поверхні розділу метал-шлак.

Чи збільшується окисленність металу при підвищенні окисленності шлаку? Розрахунки по рівнянню і дослідні дані показують, що при [%C]≥0,3 таке збільшення спостерігається, але воно незначне. Зазвичай $a_{(FeO)}L_0 \approx 0{,}07$ %. Якщо за рахунок присадок руди або збільшення інтенсивності продування ванни киснем $a_{(FeO)}L_0$ подвоїться (це крайній випадок), то [%O] збільшиться на 0,1·0,07=0,007%, тобто трохи. Насправді збільшення [%O] буде ще менше, оскільки з ростом V_C збільшиться добуток $\beta_{\mu n} S_{м.n}$, тобто зросте K_2.

Оскільки

$$V_c = 0{,}75 K_2 \left\{ [\%O] - \frac{P_{co} \cdot 10^5}{K_c [\%C]} \right\}, \tag{1.24}$$

то

$$\Delta[\%O] = [\%O] - \frac{P_{co} \cdot 10^5}{K_c [\%C]} = \frac{V_c}{0{,}75 K_2} \tag{1.25}$$

трохи збільшується з ростом V_c (у ряді випадків зберігається або дещо зменшується).

Інше спостерігаємо при [%C] менше 0,2 мас. часток, %. При низькому вмісті вуглецю одночасно відбувається різке зменшення V_c і збільшення окисленності шлаку і металу. Це обумовлено тим, що значна частина кисню, що поступає у ванну, витрачається не лише на окислення вуглецю, але і на підвищення $[\%O]_{ð.-} = \frac{m P_{co}}{[\%C]}$. Швидкість цього підвищення в часі

$$\frac{d[\%O]_{\text{р.с}}}{d\tau} = -\frac{P_{co}\cdot 10^5}{K_c[\%C]^2}\frac{d[\%C]}{d\tau} \tag{1.26}$$

і різко збільшується при малому вмісті вуглецю (див. рис. 1.2, перегин на гіперболі $[O]=\frac{P_{co}\cdot 10^5}{K_c[\%C]}$). Одночасно зі збільшенням $[\%O]_{\text{р.с}}$ відбувається збільшення $[\%O]_{\text{р.с}}+\Delta[O]$, а також вміст (FeO) в шлаку, що в сукупності знижує коефіцієнт використання кисню, що поступає у ванну, на окислення вуглецю і зменшує V_c. На підставі цих передумов нами отримано наступне диференціальне рівняння [4]:

$$V_c = -\frac{d[\%C]}{d\tau} = \frac{0{,}75V_{O_2}}{1+\frac{a}{[\%C]^2}}, \tag{1.27}$$

де V_{O2} - швидкість підведення кисню у ванну, %/с;

$$a = 0{,}75mP_{co}\left(1+\frac{0{,}0022\cdot\%Q}{\gamma_{FeO}L_0}\right) = 0{,}012...0{,}020 \tag{1.28}$$

m - коефіцієнт, що враховує накопичення кисню в металі і в шлаку;

Q - кількість шлаку, % до маси металу; γ_{FeO} - коефіцієнт активності FeO; L_0=0,0023 при 1600°С.

Результати розрахунку по рівнянню при V_{O2}=1,0 мас. часток, % *O*/с і а=0,015 приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати розрахунку швидкості вигорання вуглецю

Величина	Отримані дані								
[%*C*]	1,0	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,03
V_c %/год	0,74	0,73	0,72	0,70	0,64	0,54	0,30	0,107	0,042
$\frac{V_c}{V_{c,\max}}=\frac{V_c}{0{,}75V_c}$	0,99	0,98	0,96	0,93	0,85	0,72	0,40	0,14	0,056

Розрахунок, що узгоджується з дослідними даними, показує (рис. 1.5), що значне зменшення V_c настає при [%C]<0,3 мас. часток, % і при подальшому зниженні [%C] збільшується швидкість накопичення кисню в металі і шлаку (заштрихована область на рис. 1.5).

Таким чином, при низькому вмісті вуглецю різко зменшується V_c. Це призводить до зниження інтенсивності перемішування металу і зменшення сумарної поверхні бульбашок СО у ванні. В результаті зменшується $K_2=\beta_{\mu n}S_{м.п}/V_м$ і відношення K_2/K_1.



1 - 0,48; 2 - 0,36; 3 - 0,24

Рисунок 1.5 – Взаємозв'язок між концентрацією вуглецю і швидкістю його вигорання у ваннах великовантажних мартенівських печей при різній інтенсивності вступу кисню в метал V_{O2}, %/год

Це призводить до збільшення "долі впливу" окисленності шлаку на [%O]. За дослідними даними, при [%C]<0,2 мас. часток %

$$[\%O] \approx 0{,}3a_{(FeO)}L_0 + 0{,}7\frac{mP_{co}}{[\%C]}. \qquad (1.29)$$

Відповідно до рівняння $1+\frac{K_2}{K_1} \approx 3{,}3; \frac{K_2}{K_1} \approx 2{,}3.$

Це означає, що при низькому вмісті вуглецю відношення поверхні бульбашок СО до поверхні шлаку приблизно в 4 рази менше, ніж при високому [%C].

Розрахунки по рівнянню показують, що при низькому [%C] збільшення $a_{(FeO)}L_0$, наприклад на 0,05%, призводить до збільшення [%O] на 0,015 мас. часток, %, що може істотно погіршити якість сталі.

З викладеного виходить, що при високому [%C] (більше 0,3 мас. часток, %) інтенсифікація процесу зневуглецювання сталі (інтенсивне продування ванни, присадка руди при збереженні нормального перегрівання металу) не викликає збільшення окисленності стали і погіршення її якості.

При низькому [%C] (менше 0,2 мас. часток, %) потрібні заходи обережності: запобігання значному підвищенню $a_{(FeO)}$ у кінці продування; попереднє розкислювання металу і шлаку перед випуском; припинення продування ванни або зменшення її інтенсивності за деякий час перед випуском; поліпшення методів розкислювання сталі в ковші.

1.6 Критична концентрація вуглецю

Критична - це така концентрація, нижче за яку різко зменшується V_c (див. рис. 1.4). Причина цього зменшення пояснена у виведенні попередніх рівнянь. У літературі зустрічаються і інші пояснення критичної концентрації вуглецю.

При [%C]>0,3 мас. часток, % процес знаходиться в дифузійній, а при [%C]<0,2 мас. часток, % в кінетичній області (лімітуючою стадією стає хімічна реакція окислення вуглецю). Це не узгоджується з сучасними поглядами про більшу швидкість хімічних реакцій в порівнянні з дифузією при високих температурах.

При [%C] нижче за критичну концентрацію дифузія вуглецю в зону реакції лімітує швидкість процесу в цілому.

При малому [%C] поверхнева концентрація $[\%C]_{пов} \approx 0$.

Тому

$$V_c = \beta_c \left\{ [\%C] - [\%C]_{пов} \right\} \frac{S_n}{V_\mu} \approx \beta_c [\%C] \frac{S_n}{V_\mu}, \qquad (1.30)$$

тобто швидкість вигорання вуглецю стає прямолінійною функцією від концентрації вуглецю.

Такий висновок не можна вважати остаточно підтвердженим, оскільки навіть при дуже малих концентраціях вуглецю V_c зростає зі збільшенням інтенсивності продування ванни киснем або повітрям. Крім того, якщо при $[\%C]_{крит} \approx 0,3$

мас. часток, % вважати цю величину дифузійним градієнтом (при $[O]_{пов} \approx 0$), то з рівності дифузійних потоків, заснованої на "дифузійній стехіометрії" (до місця реакції підходять кількості атомів реагентів відповідно до стехіометрії реакції) отримуємо

$$\beta_c \Delta[\%C] = \frac{12}{16} \beta_0 \Delta[\%O]. \tag{1.31}$$

Звідси

$$\Delta[\%C] = 0{,}75 \frac{\beta_0}{\beta_c} \Delta[\%O]. \tag{1.32}$$

При [%O]=0,3 мас. часток, % $\Delta[\%O] \leq 0{,}01$. Якщо прийняти, що $\Delta[\%C]=0{,}3$ мас. часток, %, то це можливо лише у тому випадку, коли $\beta_0/\beta_c=40$, тобто коли коефіцієнт дифузії вуглецю в 40 разів менше коефіцієнта дифузії кисню. Це маловірогідне. Зазвичай вважають, що $\beta_c=\beta_0$. Тому $\Delta[\%C] \approx 0{,}75\Delta[\%O]$. Дифузія кисню лімітує процес і при низькому [%C] (приблизно до 0,04-0,05 мас. часток, %).

1.7 Чинники, що сприяють прискоренню вигорання вуглецю

На прискорення вигорання вуглецю впливають наступні чинники.

1. Збільшення $a_{(FeO)}$ (присадка руди при нормальному перегріванні металу).

2. Продування ванни киснем або повітрям. У сучасних мартенівських печах інтенсивність продування ванни киснем коливається в межах 7-20 $м^3/(т \cdot год)$; у сучасних конвертерах - 120-420 $м^3/(т \cdot год)$.

3. Поєднання інтенсивного підведення кисню з енергійним перемішуванням ванни.

4. Збільшення хімічного потенціалу кисню в газовій фазі.

5. Збереження перегрівання металу вище за лінію ліквідусу не менше 40°C .

6. Забезпечення нормальних умов для зародження і росту бульбашок CO.

1.8 Прискорення вигорання вуглецю при низькому його вмісті в металі

При [%C]<0,1 мас. часток, % [%O] наближається до рівноваги з шлаком. Перепади концентрацій $\{a_{(FeO)}$- $[\%O]\}$ і $\left\{[\%O]-\frac{mP_{co}}{[\%C]}\right\}$ стають дуже малими, що різко зменшує V_{O_2} . Кисень, що до того ж поступає у ванну, в основному витрачається на збільшення $[\%O]_{p.c.}=mP_{CO}/[\%C]$, що призводить до різкого зменшення V_c.

Присадка руди або продування ванни киснем малоефективні для окислення вуглецю при його вмісті в металі нижче 0,05 мас. часток, %. В даному випадку ефективніше зниження P_{CO} у бульбашках. Це можливо при використанні вакууму, але така технологія складна.

Ефективним і простим способом збільшення V_c при [%C] менше 0,05 мас. часток, % являється продування ванни інертним газом (аргоном) або повітрям. Як показали наші досліди, продування ванни повітрям забезпечило вищу V_c і глибше зневуглецювання електротехнічної сталі, чим продування киснем. Це цікаве явище пояснюється тим, що бульбашки азоту забезпечили зниження середнього значення P_{CO} в контактуємій з металом газовій фазі. В результаті збільшилася швидкість вигорання вуглецю:

$$V_c = 0{,}75\beta_0\left\{[\%C]-\frac{P_{co}\cdot 10^{-5}}{K_c[\%C]}\right\}\frac{S_{\mu m}}{V_\mu}. \qquad (1.33)$$

Такий же висновок виходить, якщо припускати, що процес лімітується дифузією вуглецю :

$$V_c = \beta_c\left\{[\%C]-\frac{P_{co}\cdot 10^{-5}}{K_c[\%O]}\right\}\frac{S_{\mu m}}{V_\mu}. \qquad (1.34)$$

Виходячи зі всього вищенаведеного можна зробити висновок, що процес окислення вуглецю і зневуглецювання мартенівської ванни є досить складним і багатостадійним, механізм якого ще досі є не до кінця встановленим. Тому на наступному етапі дослідницької роботи постає необхідність підтвердження вже існуючих наукових положень та розробка нових наукових підходів для розширення бази знань цього процесу.

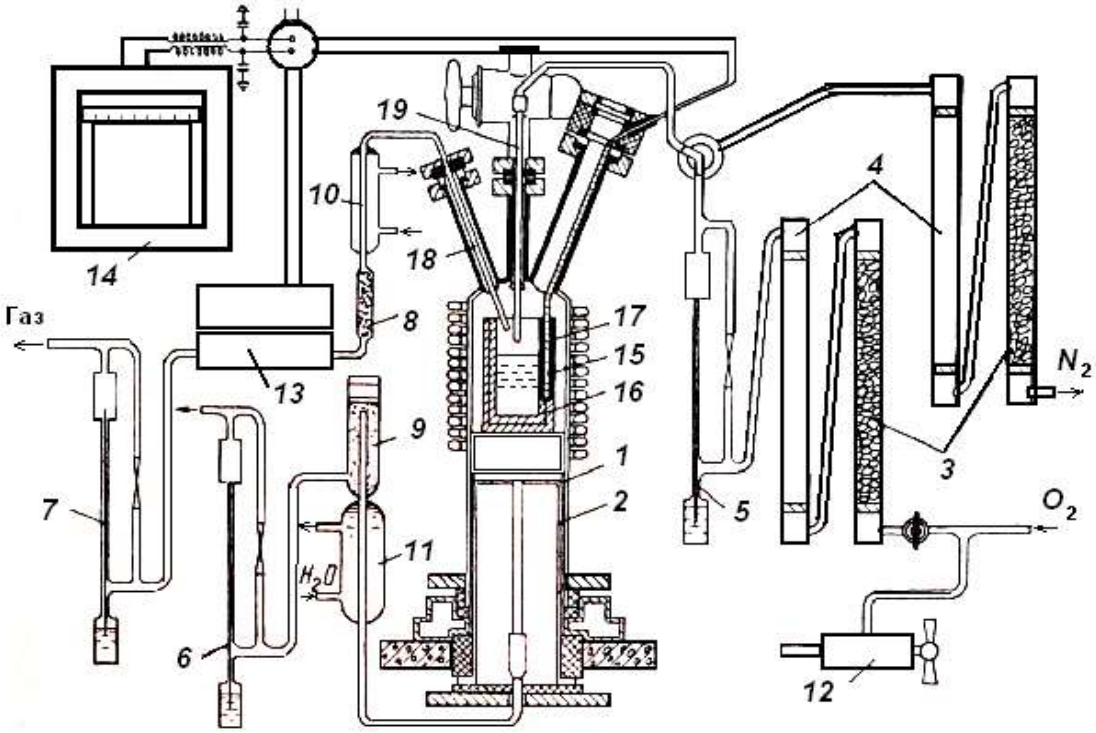
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Система технологій виробництва сталі в мартенівських печах має багату історію та безперервно удосконалюється, що в ряді випадків і визначає подальший науково-технічний прогрес у чорній металургії в цілому. У роботі проведене експериментальне дослідження з метою одержання додаткових даних процесу зневуглецювання мартенівської ванни. Лабораторні експерименти виконані на експериментальній установці. Також в роботі використовувався великий обсяг експериментального матеріалу з діючого виробництва мартенівського цеху.

При виборі методу високотемпературних кінетичних досліджень в закритих установках особливо важливе значення придбаває зниження до мінімуму побічних процесів, а також максимальне спрощення пічного пристрою без газових об'ємів, що погано обмінюються, і додаткових пристосувань, беруть участь в розподілі газів і реакціях пічної атмосфери. Ці умови можуть бути виконані, зокрема, при застосуванні манометричного (статичного) методу експериментального дослідження кінетики і рівноваги реакцій.

Пічний пристрій установки для кінетичних вимірів по такому методу зображений на рисунку 2.1. Установка призначена для дослідження кінетики процесу окислення вуглецю, розчиненого в рідкому залізі. Робочий об'єм має просту конфігурацію. Розташування гарячої частини системи внизу цього об'єму запобігає можливість значного розвитку термічної дифузії в нерухомій газовій фазі. Газ з важчою молекулою CO, при цьому не може концентруватися в холоднішій частині системи - її верхньому відростку, оскільки має тенденцію опускатися в нижню частину об'єму. Її скупчення нижче поверхні реакційної зони унеможливлюється заповненням простору навколо тигля корундовою крупкою. Зовнішнє водяне охолодження реакційної трубки дозволяє розв'язати проблему її стійкості при витримці рідкого металу з температурою до 1600° С і більше, а також забезпечує герметичність і можливість вакуумування при робочих температурах. Застосування зовнішнього високочастотного нагріву і манометричного методу кінетичних вимірів виключає які-небудь додаткові пристосування усередині робочого об'єму, а отже, і можливі процеси з пічною атмосферою на їх

поверхні. Посудина, що служить для підготовки реакційного газу і введення його в робочий об'єм, після введення відключається і не утрудняє газового обміну в реакційному просторі. Початковий тиск фіксується по манометру посудини, перед його відключенням від робочого об'єму. Диференціальний манометр фіксує зміни тиску в системі з моменту його включення, який співпадає в часі з моментом перекриття об'єму і початком процесу.



1, 2 - реакційна ємність; 3, 4 - осушувачі; 5-7 - реометри;
8-11 - фільтри і холодильники; 12 - натікач; 13 - електрогазоаналізатор;
14 - ЕПП; 15, 16 - термопара; 17 - екран; 18 - сопло; 19 - газоогорожна трубка

Рисунок 2.1 – Схема установки для дослідження кінетичних періодів і механізму окислення залізовуглецевих розплавів

Зміна об'єму газової фази відбувається за рахунок взаємодії розчинених в рідкому залізі вуглецю і кисню, або за рахунок введеної в систему CO_2 (у суміші із CO або в чистому вигляді) :

$$[C] + [O] \rightarrow CO$$

$$[C] + CO_2 \rightarrow 2CO.$$

У першому випадку склад газової фази в реакційному об'ємі є практично однокомпонентним, і виміри проводяться на основі класичного манометричного

методу. У другому випадку має місце двокомпонентна газова фаза зі зміною співвідношення компонентів, у зв'язку з перетворенням CO_2 на CO при протіканні реакції. Проте, збільшення тиску за рахунок приросту об'єму є однозначною кінетичною характеристикою досліджуваного процесу. Застосування методу для кількісних розрахунків вимагає внесення поправок на гарячий об'єм, які для цієї установки порівняно легко можуть бути визначені експериментально.

Незважаючи на відсутність примусового руху початкової газової фази і продукту реакції, умисне не передбаченого для збереження простоти пічного пристрою, кінетичні криві показують значну інтенсивність взаємодії реагентів. Наявність великого числа (проміжних) точок на кінетичних кривих (до чотирьох) дозволяє чітко встановити характер останніх і аналітично визначити досліджувані кінетичні закономірності.

Вдається простежити також цікаві деталі, що дозволяють розкрити особливості механізму процесу, наприклад наявність окремих ділянок на кінетичних кривих, що свідчить про періодичність конвективного обміну реагенту CO_2 і продукту реакції CO над поверхнею залізовуглецевого розплаву і підтверджує лімітацію процесу доставкою газоподібного окисника до реакційної поверхні. Ці приклади ілюструють доцільність застосування манометричного методу для високотемпературних кінетичних вимірів, за умови розробки відповідної експериментальної установки.

В установці передбачено відкачування з системи багатоступінчастим форвакуумним насосом і заповнення очищеним інертним газом. При перекритті крану є можливість пропустити увесь реакційний газ через пастку дьюаром і таким чином визначити усю кількість наявного в нім двоокису вуглецю.

У цій установці вдало вирішено питання боротьби з викидами оксидів з тигля при надзвичайно бурхливо і швидко протікаючої реакції з утворенням газоподібного продукту. Тигель має спеціальну конструкцію з відповідною системою каналів, що повідомляються. Реагуюче навішування після скидання потрапляє на дно нижнього каналу. Таким чином, одно з істотних ускладнень, пов'язане з невизначеністю ваги реагуючого оксиду при викидах, усунено. Автоматично діючий манометр дозволяє здійснювати фіксацію ходу процесу, що три-

ває всього декілька секунд.

Застосований метод вимагає введення поправок на гарячий об'єм. Потрібний також облік додаткових процесів на перегонах, що утворюються на стінках посудини внаслідок високих температур дослідження (до 1700-1800 °С). Проте зважаючи на дуже короткий час протікання основного процесу вплив цих процесів, очевидно, невеликий.

Розроблена установка з використанням манометричного методу високотемпературних кінетичних вимірів дозволила успішно досліджувати кінетичні закономірності процесу зневуглецювання мартенівської сталі.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО - ХІМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ЗНЕВУГЛЕЦЮВАННЯ МАРТЕНІВСЬКОЇ ВАННИ

3.1 Особливості кінетики процесу зневуглецювання мартенівської ванни

Теоретичні дослідження неодноразово підтверджені практикою показали, що акт хімічної взаємодії вуглецю з киснем в рідкій сталі при температурі сталеплавильних процесів (1500- 1650^{0}С) протікає миттєво, а процес зневуглецювання лімітується або умовами зародження, росту і виділення нової газоподібної фази - бульбашок СО або швидкістю доставки реагентів до реакційної зони.

На підставі сучасних уявлень про фізико-хімічні властивості залізовуглецевого розплаву більшість дослідників дотримуються тієї точки зору, що зародження, мимовільний ріст і виділення бульбашок окислу вуглецю в об'ємі металу неможливі, а зародження бульбашок СО відбувається на твердих незмочуваних шорстких поверхнях (шматочки, що не розчинилися, шлакотворних і окисників в шлаку, подина і укоси мартенівської печі).

В період кипіння, у міру підйому температури, фронт кипіння з підшлакового шару переміщається на подину і укоси, що пов'язано зі зникненням ошлакованого шару і розкриттям пір поду і укосів. У цей період зародження, росту і виділення бульбашок СО реакція окислення вуглецю протікає в дифузійній області і лімітуючою ланкою зневуглецювання є доставка реагентів - кисню або вуглецю - до реакційної зони (поду і укосам мартенівської печі).

Слід зазначити, що окислення вуглецю може протікати на поверхні спливаючих бульбашок СО. Проте щоб мало місце окислення вуглецю на поверхні бульбашок СО, потрібне протікання реакції окислення вуглецю на поду і укосах печі, що є першопричиною утворення цих бульбашок.

Не зупиняючись детально на аналізі робіт, присвячених виявленню лімітуючої ланки процесу зневуглецювання мартенівської ванни за звичайних умов роботи, можна відмітити, що більшість дослідників вважає, що швидкість окислення вуглецю контролюється доставкою (масопереносом) кисню. Проте при визначенні провідної ланки масопереносу кисню думки дослідників розходяться. Так, наприклад, доставка кисню у ванну, лімітується або переходом вюститу

через кордон шлак-метал, або дифузією окислювальних газів з атмосфери печі через надшлаковий шар газу (багатий окислом вуглецю), або швидкістю окислення продуктами згорання закису заліза у вищі оксиди, або швидкістю переходу кисню через граничний шар металу з шлаком і газовою бульбашкою.

Нарешті, останнім часом існує точка зору про те, що реакція окислення вуглецю протікає в дифузійній області, але у міру пониження концентрації вуглецю відбувається зміна лімітуючої ланки: при вмісті вуглецю вище "критичних" процес зневуглецювання лімітується перенесенням окисника з газової фази в реакційну зону. При концентраціях нижче "критичних" лімітуючою ланкою процесу стає перенесення вуглецю з розплаву в реакційну зону.

Проте реальний характер зміни швидкості окислення вуглецю в період чистого кипіння більше складений, ніж можна пояснити з точки зору тільки однієї з розглянутих гіпотез про лімітуючу ланку процесу зневуглецювання.

На рис. 3.1 і 3.2 представлені криві залежності швидкості окислення вуглецю в період чистого кипіння і окисленості шлаку і металу при виплавці різних марок сталі від концентрації вуглецю. Характерно, що у міру пониження концентрації вуглецю швидкість окислення вуглецю на початку збільшується, проходить через максимум, відповідний 0,30-0,35% С, а потім різко знижується. При цьому криві окисленності шлаку є практично дзеркальним відображенням кривої зміни швидкості зневуглецювання V_c.

Якщо припустити, що процес зневуглецювання при будь-яких концентраціях вуглецю лімітується доставкою (масопереносом) кисню, то тоді важко пояснити різке зниження V_c при концентраціях вуглецю нижче 0,30-0,35%.

На правій гілці кривої V_c до максимуму відбувається помітне підвищення швидкості зневуглецювання при пониженні концентрації вуглецю. Це явище можна пояснити поліпшенням умов доставки кисню до реакційної зони у міру підвищення температури металу, підвищення гомогенності і киснепроникності шлаку. Слід зауважити, що при зниженні концентрації вуглецю з 0,8 до 0,35% окисленність металу підвищується більш ніж в 1,5 разу, а сумарна концентрація оксидів заліза в шлаку знижується на 15-22%.

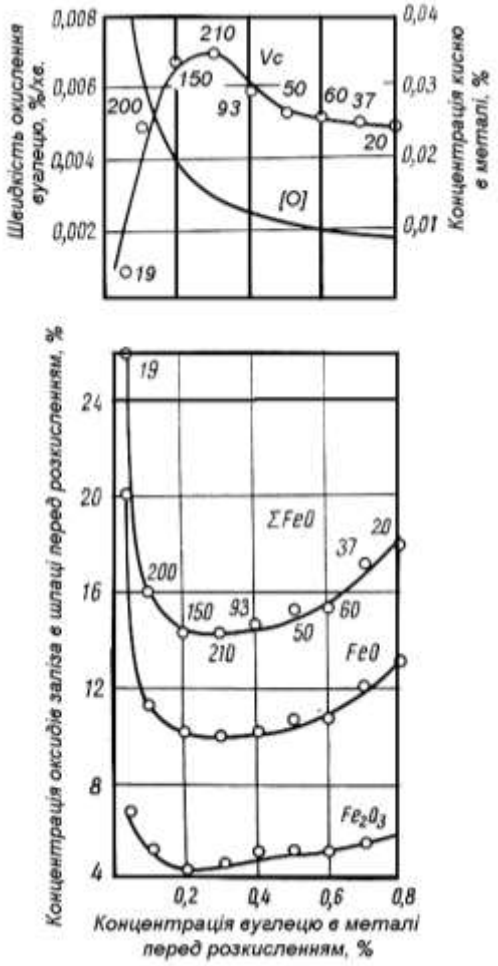


Рисунок 3.1 – Залежність швидкості окислення вуглецю за останні 20-30 хв., окисленості металу і кінцевого шлаку від концентрації вуглецю перед розкисленням в 250-т мартенівській печі. Цифри у точок - число плавок

При пониженні концентрації вуглецю нижче 0,3-0,35% має місце різке зниження швидкості окислення вуглецю. Це пониження швидкості зневуглецювання не може бути пояснене тільки різким збільшенням концентрації кисню в металі, у зв'язку з чим сповільнюється вступ кисню з шлаку і система метал-шлак наближається до стану рівноваги.

По наявних у нас даним, кипляча мартенівська ванна досить далека від стану рівноваги навіть при концентраціях вуглецю 0,10-0,07% (рис. 3.3). Присадка твердих окисників у ванну при низьких концентраціях вуглецю істотно слабкіше інтенсифікує процес зневуглецювання, чим присадка окисників у ванну при середніх концентраціях вуглецю.

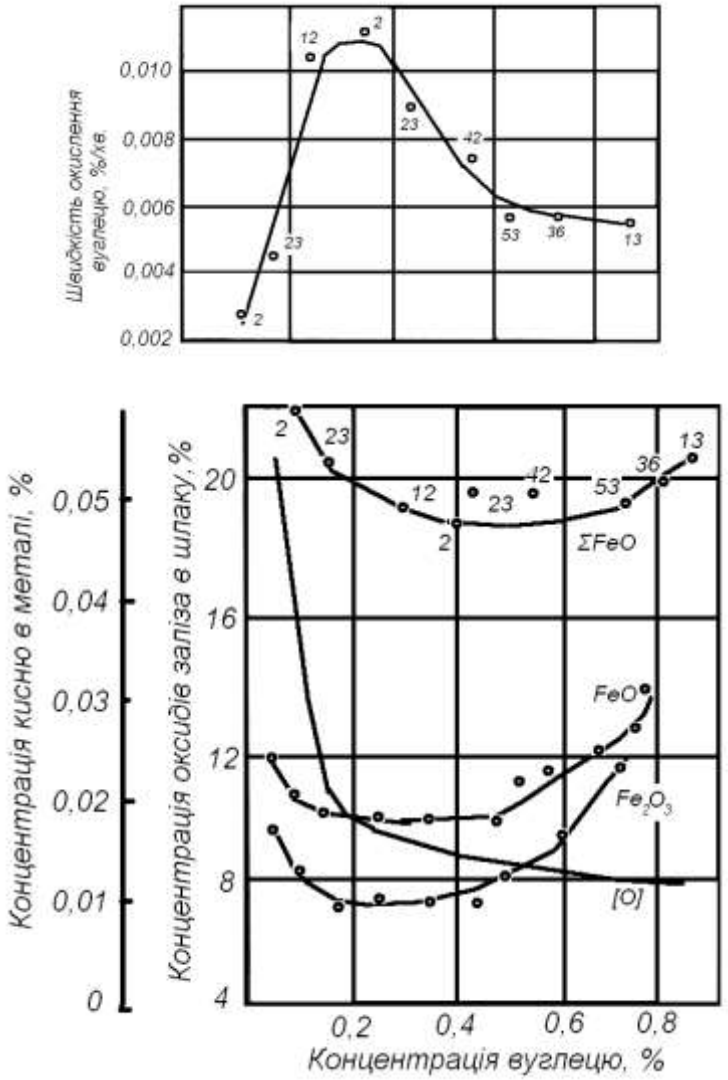


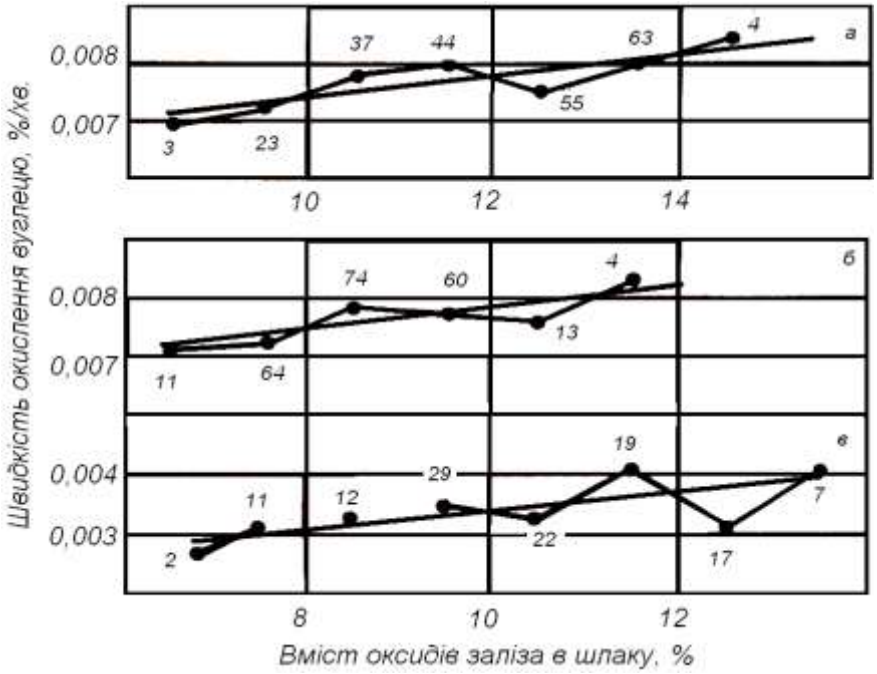
Рисунок 3.2 – Залежність швидкості окислення вуглецю і окисленості шлаку і металу від концентрації вуглецю (період чистого кипіння) в 150-т мартенівській печі. Цифри у точок - число плавок



Рисунок 3.3 – Залежність відношення фактичної концентрації кисню в киплячому металі $[O]_ф$ до концентрації кисню, рівноважної з шлаком $[O]_ш$ від концентрації вуглецю

Якщо вважати відповідальним за зниження V_c при концентраціях вуглецю

в металі нижче 0,30-0,35% перенесення вуглецю тільки до реакційної зони, то тоді важко пояснити факт підвищення швидкості зневуглецювання маловуглецевого металу при підвищенні окисленності шлаку (рис. 3.4) і після присадок у ванну окисників.



а, б - сталь 10 (50-т піч); в - сталь 12ХН3А (150-т піч)

Рисунок 3.4 – Вплив окисленності кінцевого шлаку на швидкість зневуглецювання за останні 20-30 хв. перед розкислюванням

В той же час дифузія вуглецю при концентраціях останнього вище 0,30-0,35% не чинить впливу на процес зневуглецювання, оскільки, незважаючи на пониження концентрації вуглецю, швидкість зневуглецювання підвищується.

Отже, мабуть, що в процесі зневуглецювання мартенівської ванни відбувається зміна лімітуючої ланки процесу при "критичних" концентраціях вуглецю, в даному випадку при 0,3-0,35% С. При концентраціях вуглецю вище критичних процес зневуглецювання протікає в дифузійній області і провідною ланкою є доставка (масоперенесення) кисню до реакційної зони.

Якщо припустити, що при концентраціях вуглецю нижче критичних процес зневуглецювання лімітується як доставкою кисню, так і доставкою вуглецю до реакційної зони, то стає ясним, чому заходи, спрямовані на прискорення масопереносу кисню з шлаку в метал, при концентраціях вуглецю вище критичних інтенсифікують процес зневуглецювання істотно, а при концентраціях вуглецю

нижче за критичних - трохи (процес зневуглецювання при докритичних концентраціях вуглецю лімітується ще і дифузією останнього до реакційної зони).

Як вже вказувалося, криві окисленості шлаку практично є дзеркальним відображенням кривої швидкості зневуглецювання. Мінімальна окисленність шлаку відповідає максимальній швидкості окислення вуглецю.

Шлак займає проміжне положення між газовою фазою печі і металом. Концентрація оксидів заліза в шлаку визначається за інших рівних умов витратою кисню з шлаку на зневуглецювання сталі. Збільшення швидкості окислення вуглецю обумовлює підвищення поверхні розділу шлак-метал і збільшення витрати кисню з шлаку в метал. Це у свою чергу інтенсифікує процес зневуглецювання, а окисленність шлаку при цьому знижується.

Пониженню окисленості шлаку сприяє розкислююча дія кількості, що збільшується, CO і погіршення умов переходу кисню з газової фази в шлак внаслідок утворення надшлакового шару газу, багатого CO.

Якби процес зневуглецювання лімітувався тільки масопереносом кисню, то швидкість окислення вуглецю або безперервно збільшувалася, або залишалася рівномірно високою аж до дуже низьких концентрацій вуглецю, а окисленність шлаку безперервно знижувалася або залишалася постійною. Проте в області концентрацій вуглецю нижче критичних в процесі зневуглецювання з'являється нова лімітуюча ланка або ланки (можливо, одно з них - перенесення вуглецю до реакційної зони). Внаслідок цього швидкість числення вуглецю знижується, знижується поверхня розділу шлак-метал, знижується витрата кисню на зневуглецювання, а окисленність шлаку помітно підвищується, оскільки окислювальний потенціал атмосфери печі залишається в період кипіння практично постійним.

На рис. 3.1 і 3.2 звертає на себе увагу факт істотного підвищення швидкості окислення вуглецю при концентраціях останнього 0,5-0,3%. Це явище пов'язане з добре відомим на практиці "саморозкипанням", яке має місце саме в цьому інтервалі концентрацій вуглецю.

Самоприскорення процесу кипіння пояснюється з точки зору швидкості окислення вуглецю, інтенсивності перемішування системи метал - шлак і зале-

жності коефіцієнта масо-переносу від інтенсивності перемішування.

Інтенсивність перемішування системи метал-шлак прямо пропорційна швидкості вигорання вуглецю. Починаючи з деякої інтенсивності перемішування показник міри для коефіцієнта масопередачи стає більше одиниці. Якщо коефіцієнт масопередачи залежить від інтенсивності перемішування, т. е. від швидкості вигорання вуглецю, в мірі більше одиниці, то процес починає самопришвидшуватися.

Якщо механізм процесу самоприскорення кипіння металу, пов'язаний з помітним підвищенням потоку кисню в метал, досить ясний, то абсолютно незрозуміло, чому процес самоприскорення має місце саме у вказаному інтервалі концентрацій вуглецю. Відомостей з цього питання в літературі немає.

Можливо, що для пояснення цього явища потрібне знання закономірностей зміни структури рідкого металу при його зневуглецюванні.

Встановлено, що при збільшенні концентрації вуглецю приблизно від 0 до 0,1-0,2% при постійній температурі в'язкість металу різко знижується. Подальше підвищення концентрації вуглецю до 0,45-0,5% помітно підвищує в'язкість металу, що зв'язується з перебудовою структури ближнього порядку. При вищих концентраціях вуглецю відбувається поступове зниження в'язкості, що обумовлено ростом вільного об'єму розплавів при підвищенні концентрації вуглецю.

Нами зроблена спроба оцінити зміну в'язкості залізовуглецевого розплаву при одночасній зміні температури металу і концентрації вуглецю в нім. Відповідні дані для температурних умов 500- і 250-т мартенівських печей представлені на рисунку 3.5.

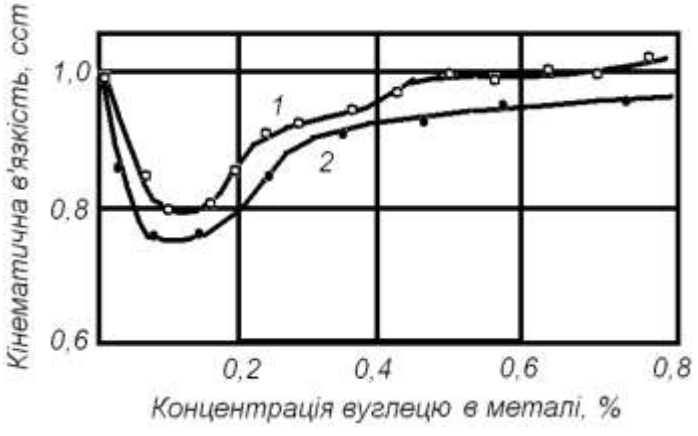


Рисунок 3.5 – Зміна кінематичної в'язкості залізовуглецевого розплаву для різних температурних умов мартенівської печі : 1 - 500-т; 2 - 250-т

Як видно з даних, в інтервалі концентрацій вуглецю більше 0,5% кінематична в'язкість розплаву при одночасній зміні концентрації вуглецю і температури залишається практично постійною. При зниженні концентрації вуглецю нижче 0,5% кінематична в'язкість металу знижується, особливо помітно в області концентрацій нижче 0,4%. Мінімум кінематичної в'язкості відповідає концентрації вуглецю близько 0,1%. Підвищена в'язкість при малих концентраціях вуглецю (нижче 0,1%) пов'язана з утворенням малорухомих залізокисневих мікроугрупувань або комплексних аніонів.

Порівняння даних про початок "саморозкипіння" мартенівської ванни і зміні кінематичної в'язкості залізовуглецевого розплаву (рис. 3.5) показує, що "саморозкипіння" ванни, початок зниження кінематичної в'язкості металу і перебудова структури ближнього порядку відповідають однаковій концентрації вуглецю - менше 0,5-0,4%.

Можна припустити, що початок "саморозкипіння" ванни пов'язане з початком перебудови структури ближнього порядку при певних концентраціях вуглецю в металі в процесі його зневуглецювання. Можливо, що при перебудові структури полегшуються умови зародження і виділення бульбашок CO.

Проте при концентраціях вуглецю менш критичних швидкість окислення вуглецю знижується, незважаючи на дуже сприятливі умови масопереносу кисню і відсутність зміни характеру перебудови структури ближнього порядку. Очевидно, при цьому одночасно змінюються як умови зародження нової фази, так і лімітуюча ланка процесу; процес зневуглецювання в цьому випадку лімітується також і дифузією вуглецю. В результаті, незважаючи на сприятливіші умови зародження нової фази, швидкість процесу в цілому зменшується.

На рис. 3.5 видно, що крива кінематичної в'язкості 2, що відповідає температурним умовам 75-т мартенівської печі, повторює хід кривої 1, що відповідає температурним умовам 150-т мартенівської печі, але при вмісті вуглецю більше 0,3% проходить значно вище, що обумовлює сприятливіші умови для процесу зневуглецювання (порівняй рис. 3.1 і 3.2). Проте в обох випадках закономірність зміни V_c при зміні концентрації вуглецю однакова: на кривій V_c є максимум, що відповідає критичним концентраціям вуглецю.

3.2 Температурні умови процесу зневуглецювання і нагріву мартенівської ванни

Одним з невирішених до теперішнього часу завдань, надзвичайно важливим для практики виробництва, є встановлення обґрунтованих співвідношень між температурою металу і швидкістю зневуглецювання, що забезпечують упевненість в отриманні якісного металу за умови максимальної інтенсифікації процесу.

Для з'ясування взаємозв'язку процесів зневуглецювання і нагріву мартенівської ванни в період її чистого (активного) кипіння була проведена статистична обробка 1400 плавок різних марок сталі (більше 2800 вимірів температури металу вольфрам-молібденовою термопарою занурення в період чистого кипіння). Усі плавки проведені в мартенівському цеху комбінату "Запоріжсталь" на 250-т основних печах.

Для усунення впливу неврахованих чинників на температурний режим і процес зневуглецювання при відборі матеріалу з паспортів плавок були зроблені наступні обмеження:

1) для аналізу використані тільки плавки з 20 по 350 в кампанії по зведенню;

2) не враховували плавки високолегованої сталі (наприклад, 12ХН3А, 20Х2Н4А та ін.);

3) не враховували плавки з присадками залізняку, вапна і феромарганцю в період чистого кипіння;

4) не враховували плавки з використанням кисню у факел в період завалки і плавлення;

5) відбирали плавки, що мали не менше двох-трьох вимірів температури металу в період чистого кипіння.

Усі початкові технологічні параметри розділяли на групи, кожну з яких розглядали при певному вмісті вуглецю в рідкій сталі.

Методом кореляційного аналізу складені парні рівняння регресії для визначення взаємозв'язку деяких технологічних параметрів періоду чистого кипіння мартенівської ванни. В якості показників тісноти зв'язку між параметрами вичислені теоретичні коефіцієнти кореляції r, середньоквадратичні помилки ко-

ефіцієнтів кореляції σr і показники тісноти зв'язку $\mu=r/\sigma_r$.

При цьому, з вірогідністю більше 0,99, зв'язок вважали не випадковим, якщо коефіцієнт кореляції перевищував свою середньоквадратичну помилку більш ніж в 2,6 разу, т. е. $\mu > 2,6$.

Зв'язок між величинами для парних залежностей встановлювали або у формі прямої лінії ($y = a + bx$), або у вигляді параболи ($y = a + bx + cx^2$).

Для встановлення, яка з парних залежностей між однією функцією у і двома змінними x і z - $y = f(x)$ або $y = \varphi(z)$ статистично достовірніша, розраховували критерій χ, середньоквадратичну помилку критерію σ_χ і коефіцієнт надійності критерію μ_χ:

$$\chi=r^2yx- r^2yz;\ \sigma_\chi = 2\sqrt{\frac{\chi}{n}};\ \mu_\chi = \chi / \mu_\chi$$

де n - об'єм інформації.

Якщо $\mu_\chi > 2,6$, то з вірогідністю більше 0,99 залежність $y = f(x)$ статистично достовірніша, ніж залежність $y = \varphi(z)$.

Прийняті позначення:

V_c - швидкість окислення вуглецю, % С/хв.;

V_t - швидкість нагрівання металу, град/хв.;

t - температура металу, °С;

Δt - перегрівання металу над ліквідусом. При цьому температуру ліквідусу розраховували по співвідношенню: $t_л= 1530 - 71$ (% С).

3.2.1 Вплив перегрівання металу над ліквідусом на швидкість окислення вуглецю в мартенівській ванні

Багатьма дослідниками встановлений сприятливий вплив рівномірно високих або таких, що підвищуються швидкостей окислення вуглецю на газонасиченість металу і вміст неметалічних включень. У зв'язку з цим значний інтерес представляє дослідження залежності швидкості окислення вуглецю від перегрівання металу над ліквідусом.

Як відомо, підвищення перегрівання металу над ліквідусом збільшує рідкотекучість металу і шлаку, що повинне сприятливо позначитися на швидкості

протікання реакцій сталеплавильного процесу.

На рис. 3.6 і 3.7 представлені емпіричні і теоретичні лінії регресії залежності швидкості окислення вуглецю від перегрівання металу над ліквідусом при різному вмісті вуглецю у ванні. Відповідні теоретичні рівняння регресії, коефіцієнти кореляції і критерії надійності зведені в таблиці 3.1.

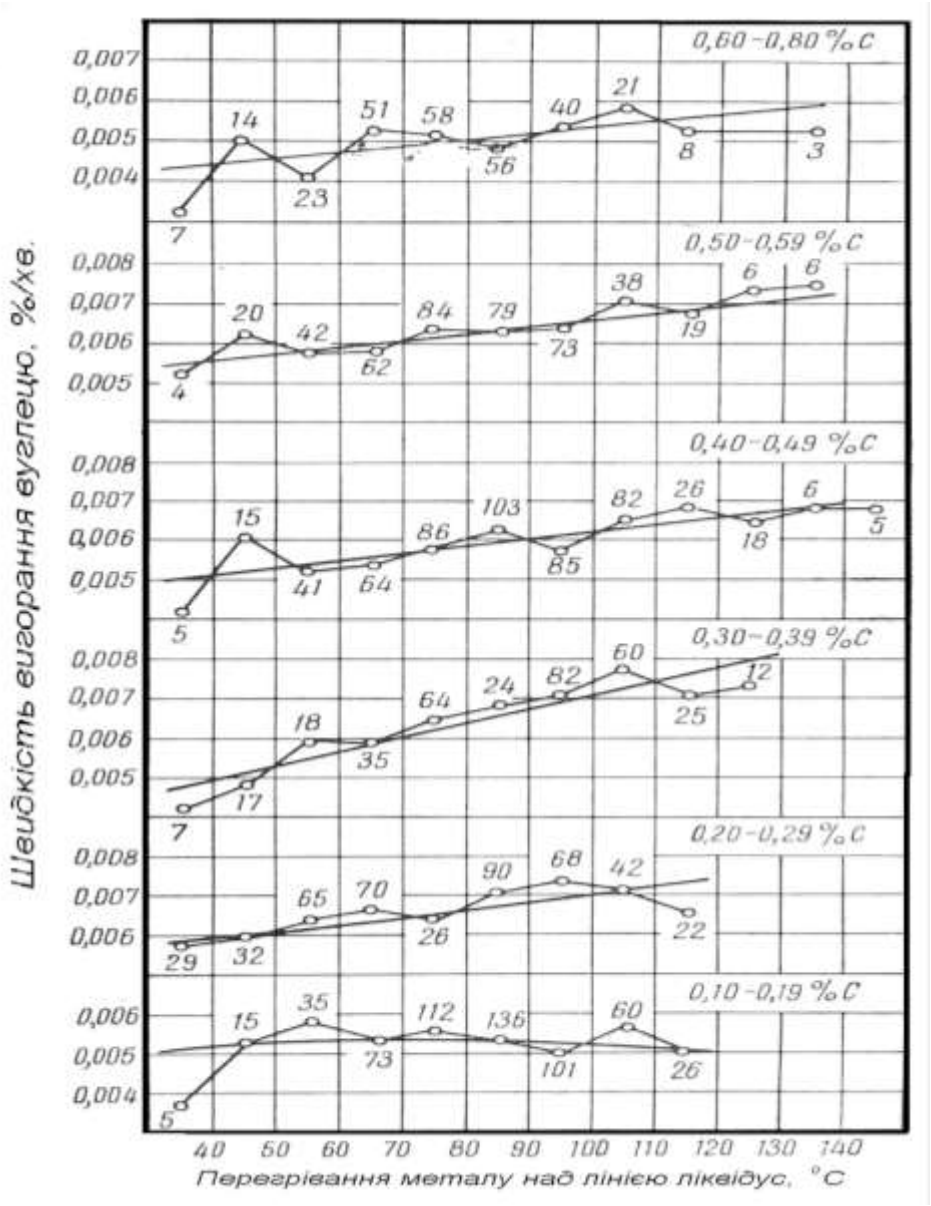


Рисунок 3.6 – Вплив перегрівання металу над ліквідусом на швидкість зневуглецювання металу (цифри у точок - число вимірів температури рідкої сталі)

Як видно з обговорюваних даних, з підвищенням перегрівання металу над ліквідусом збільшується швидкість окислення вуглецю. Виняток становить концентрація вуглецю від 0,10 до 0,19%, де залежність швидкості зневуглецювання від перегрівання над ліквідусом параболічна з пологим максимумом при 45-50 ^{0}C.

Таблиця 3.1 – Залежність швидкості окислення вуглецю від перегрівання металу над ліквідусом

Концентрація вуглецю, %	Число вимірів температури	Теоретичні рівняння регресії	r	μ
0,10 - 0,19	563	$V_c = 0{,}0047+0{,}0005\Delta t + 0{,}00000012t^2$	0,107	2,6
0,20 - 0,29	494	$V_c = 0{,}00534-0{,}000018\ \Delta t$	0,152	3,46
0,30 - 0,39	394	$V_c = 0{,}0036+0{,}000036\ \Delta t$	0,288	6,25
0,40 - 0,49	536	$V_c = 0{,}0045+0{,}000017\ \Delta t$	0,167	3,99
0,50 - 0,59	433	$V_c = 0{,}0038+0{,}000018\ \Delta t$	0,175	3,76
0,60 - 0,80	281	$V_c = 0{,}0038+0{,}000016\ \Delta t$	0,143	2,6

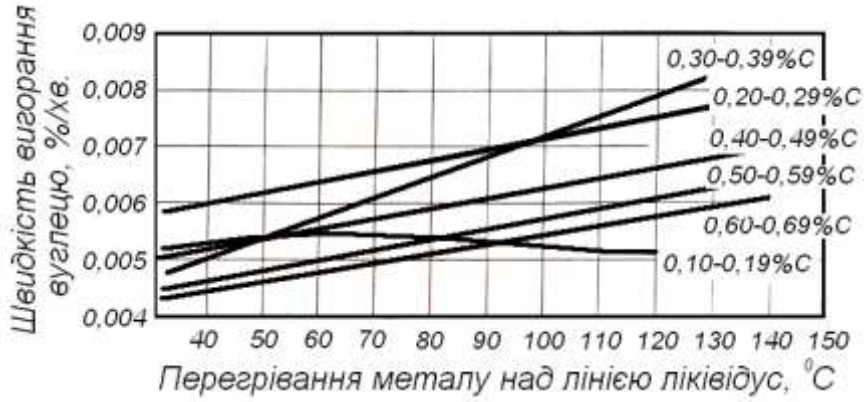


Рисунок 3.7 – Вплив перегрівання металу над ліквідусом на швидкість вигорання вуглецю при різних концентраціях вуглецю в мартенівській ванні

У інтервалі концентрації вуглецю від 0,80 до 0,20% швидкість зневуглецювання металу при усіх перегріваннях зростає. При цьому усі лінії регресії (див. рис. 3.7) практично паралельні між собою. Це дозволяє зробити висновок, що в цьому інтервалі концентрацій вуглецю механізм впливу перегрівання металу на швидкість зневуглецювання однаковий і пов'язаний, видно, з полегшенням умов транспортування кисню до реакційної зони.

При цьому виключення складає залежність V_c від перегрівання металу в інтервалі 0,30-0,39% С. В цьому інтервалі концентрацій вуглецю має місце найбільше зростання швидкості зневуглецювання металу з ростом перегрівання металу (коефіцієнт регресії при Δt в два рази більше, ніж коефіцієнти регресії при Δt для інших залежностей, див. таблицю 3.1).

Це явище, ймовірно, пов'язане з добре відомим з практики істотним підвищенням Δt при вмісті вуглецю у ванні 0,30-0,50% (так зване "саморозкипін-

ня"). З рис. 3.7 видно, що саме в цих межах вмісту вуглецю збільшення перегрівання над ліквідусом дає найбільший приріст швидкості окислення вуглецю. Підвищення Δt збільшує поверхню розділу метал-шлак, що обумовлює підвищення потоку кисню з шлаку (і через шлак) в метал, що у свою чергу збільшує швидкість окислення вуглецю і т. п., тобто процес кипіння самопришвидшується. В результаті цього шлак обідняється оксидами заліза, оскільки окислювальна здатність атмосфери печі у цей момент нижче, ніж можливості сталеплавильної ванни переробити кисень, що поступає.

Існує припущення, відповідно до якого пониження кінематичної в'язкості металу при концентраціях вуглецю нижче 0,50% в період кипіння викликає саморозкипіння ванни. Проте бурхливе кипіння ванни обмежене в часі; при пониженні концентрації вуглецю нижче критичною в процесі зневуглецювання з'являється нове, окрім перенесення кисню, лімітуюча ланка - перенесення вуглецю до реакційної зони. Відповідно до цього швидкість окислення вуглецю надалі помітно знижується.

На рис. 3.8 представлена залежність швидкості зневуглецювання від концентрації вуглецю в металі при різних перегріваннях металу над ліквідусом, побудована за даними теоретичних ліній регресії.

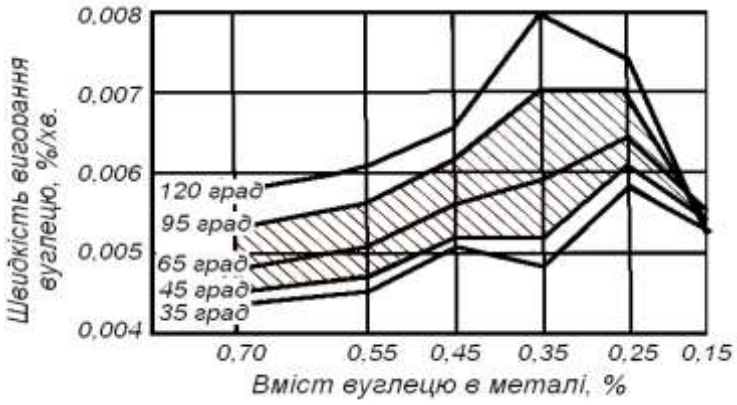


Рисунок 3.8 – Залежність швидкості зневуглецювання металу від вмісту вуглецю в мартенівській ванні при різних перегріваннях металу над ліквідусом

При перегріваннях металу нижче 45 °С крива швидкості зневуглецювання носить нерівномірний характер, тобто спостерігаються підйоми і падіння V_c, при усіх концентраціях вуглецю, що свідчить про високу в'язкість металу і шлаку, загальмованість дифузійних і конвективних потоків передачі кисню з шлаку в метал і не-

сприятливі умови зародження, росту і виділення газоподібної фази - бульбашок CO.

Значний інтерес представляє розгляд зміни кінетики зневуглецювання у міру зміни рівня перегрівання металу (див. рис. 3.8).

При невеликих перегріваннях металу зміна характеру залежності V_c від концентрації вуглецю (що може бути пов'язане з появою нової лімітуючої ланки) відбувається при 0,20-0,30% C, а збільшення перегрівання металу над ліквідусом понад 95° C підвищує критичну концентрацію вуглецю до 0,30-0,40% C, що веде до більше раннього падіння швидкості зневуглецювання.

Нині ми не маємо в розпорядженні даних для вичерпного пояснення факту переміщення при збільшенні міри перегрівання критичних концентрацій вуглецю в область вищих його значень (в даному випадку з 0,20-0,30% в область 0,30-0,40%). Можна припустити, що справедлива точка зору, відповідно до якої при високих перегріваннях і відповідно високих швидкостях зневуглецювання (див. рис. 3.7) має місце дроблення бульбашок CO, що піднімаються від поду. При цьому метал верхніх горизонтів набуває вигляду газометалевої емульсії з відповідною зміною умов передачі кисню, дифузії вуглецю і т. п. З іншого боку, залежно від рівня перегрівання металу можуть мінятися фізичні властивості металу.

Усі ці припущення вимагають, проте, експериментальної перевірки. В усякому разі, отриманий матеріал свідчить про те, що для забезпечення високої інтенсивності процесу зневуглецювання, включаючи і область концентрацій вуглецю нижча за критичних, оптимальне перегрівання металу над ліквідусом повинне знаходитися в межах 45-95° C, оскільки при вищих перегріваннях має місце більше рання зміна кінетики процесу і відповідно падіння швидкості окислення вуглецю.

Таким чином, виявляється необхідним лімітувати не лише нижній, але і верхній межі міри перегрівання металу.

3.2.2 Вплив температури металу на швидкість нагріву рідкої сталі

При однаковому тепловому навантаженні в період чистого кипіння і постійних параметрах факела швидкість нагріву рідкої сталі залежить, ймовірно, від початкової температури металу, інтенсивності кипіння і фізико-хімічних властивостей шлаку.

Вплив початкової температури металу на швидкість нагріву рідкої сталі

На рис. 3.9 і 3.10 нанесені емпіричні і теоретичні лінії регресії залежності середньою за період між двома вимірами швидкості нагріву рідкої сталі від початкової температури при різному вмісті вуглецю в металі. Відповідні теоретичні рівняння регресії r і μ, приведені в таблицю 3.2.

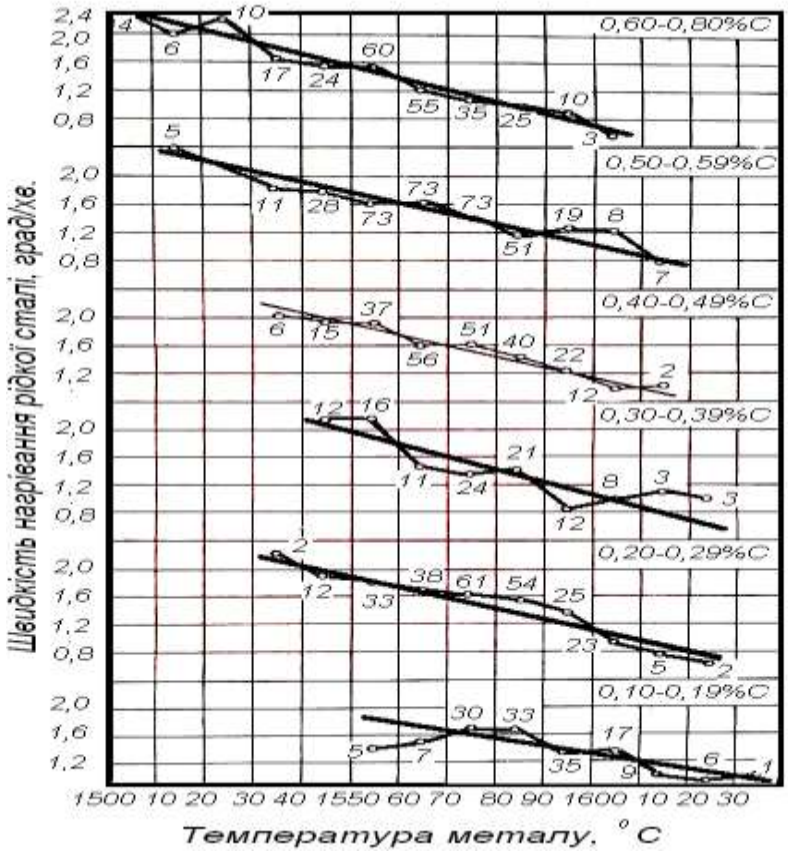


Рисунок 3.9 – Вплив початкової температури рідкої сталі на швидкість нагріву ванни (цифри у точок - число вимірів температури металу по ходу чистого кипіння)

Таблиця 3.2 – Вплив початкової температури металу на швидкість нагріву рідкої фази

Концентрація вуглецю, %	Число вимірів температури	Теоретичні рівняння регресії	r	μ
0,10 - 0,19	143	$V_t = 18{,}661 - 0{,}0108\ t_{поч}$	-0,252	3,23
0,20 - 0,29	255	$V_t = 26{,}54 - 0{,}0159\ t_{поч}$	-0,358	6,57
0,30 - 0,39	110	$V_t = 29{,}38 - 0{,}0177\ t_{поч}$	-0,420	5,35
0,40 - 0,49	241	$V_t = 25{,}59 - 0{,}0153\ t_{поч}$	-0,311	5,34
0,50 - 0,59	348	$V_t = 23{,}83 - 0{,}0142\ t_{поч}$	-0,335	7,04
0,60 - 0,80	249	$V_t = 26{,}94 - 0{,}0169\ t_{поч}$	-0,437	8,52

На рис. 3.11 представлена залежність можливої швидкості нагріву металу

при цій температурі від концентрації вуглецю у ванні.

З обговорюваних даних видно, що в усіх випадках швидкість нагріву металу зменшується зі збільшенням початкової температури.

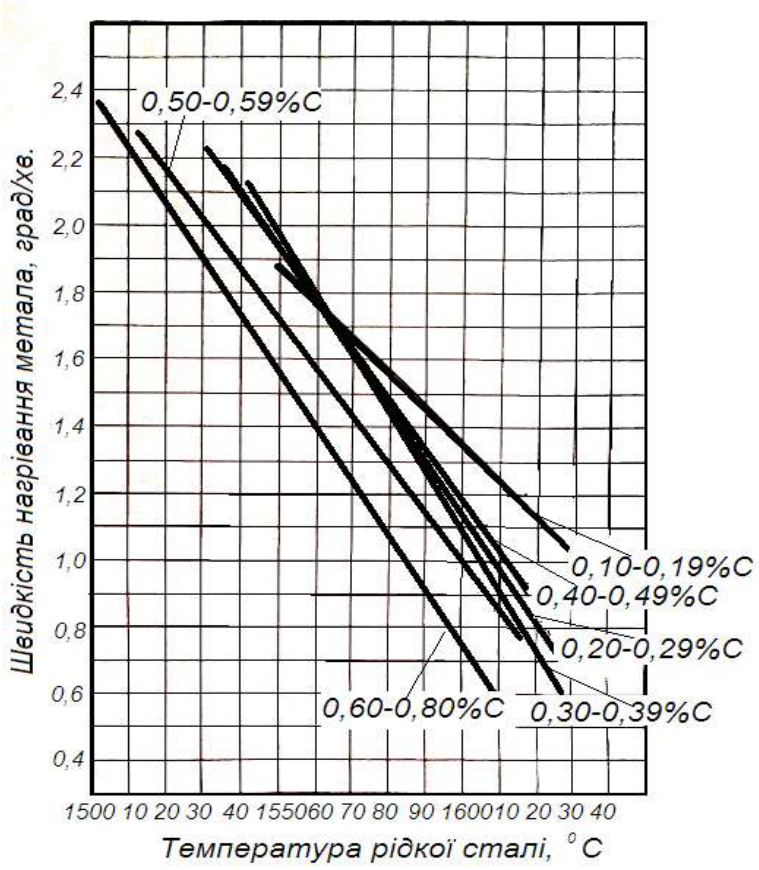


Рисунок 3.10 – Залежність швидкості нагріву рідкої сталі від попередньої їй температури металу при різному вмісті вуглецю в киплячій ванні

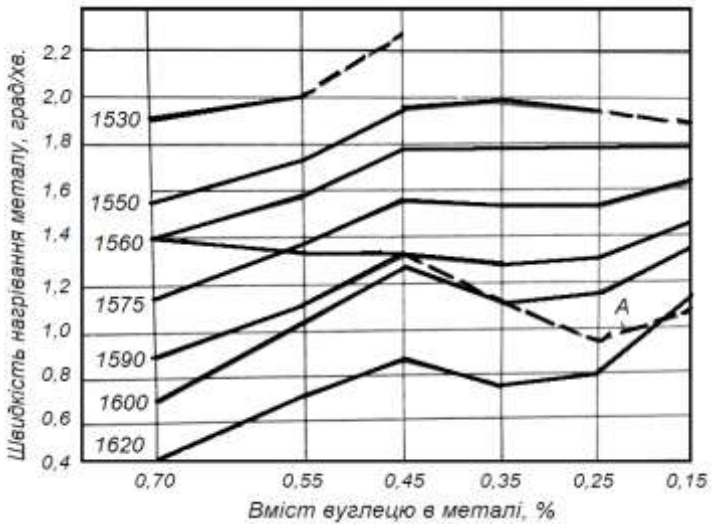


Рисунок 3.11 – Залежність можливої швидкості нагріву металу від концентрації вуглецю (цифри у кривих - температура металу)

З даних рис. 3.10 і 3.11 видно, що кут нахилу кривих залежності V_t від температури рідкої сталі при зміні концентрації вуглецю змінюється, що вказує на зміну механізму теплопоглинання металу в період його кипіння. З рис. 3.11 видно, що при значних перегріваннях металу (більше 90-100° С, крива, що відповідає 1590° С) має місце значне пониження швидкості нагріву металу при концентраціях вуглецю вище за критичних.

При низьких перегріваннях металу V_t в області критичних концентрації вуглецю практично не змінюється.

При концентраціях вуглецю нижче критичних (0,10-0,19%) можлива швидкість нагріву сталі дещо зростає внаслідок підвищення теплопровідності шлаку і металу в результаті підвищення їх щільності і зниження в'язкості.

На рис. 3.11 для наочності приведена пунктирна крива А фактичної зміни V_t при одночасній зміні температури металу і концентрації вуглецю. При цьому температура металу пов'язана з концентрацією вуглецю наступним співвідношенням ($r = 0,71$, $\mu = 13$): $t = 1642 - 118$ (% С).

Слід зазначити, що спроба відшукування залежності кінцевої температури металу від попередньої їй швидкості нагріву металу не увінчалася успіхом. На рис. 3.12 представлені теоретичні і емпіричні лінії цієї залежності для усіх інтервалів вмісту вуглецю. Розташування ліній показує на практичну відсутність зв'язки між температурою рідкої сталі і попередньої їй швидкості нагріву. Отримані коефіцієнти кореляції малі і статистично недостовірні (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Залежність температури металу від попередньої їй швидкості нагріву рідкої сталі

Концентрація вуглецю, %	Число вимірів температури	Теоретичні рівняння регресії	r	μ
0,10-0,19	496	$t_k = 1604+2,930V_t$	0,112	2,54
0,20-0,29	306	$t_k = 1600+1,38\ V_t$	0,064	1,13
0,30-0,39	337	$t_k = 1597+0,920\ V_t$	0,043	0,79
0,0,40-0,49	345	$t_k = 1590+2,140\ V_t$	0,095	1,79
0,0,50-0,59	174	$t_k = 1582+2,920\ V_t$	0,132	1,71

Таким чином, поступове пониження швидкості нагріву металу в період чистого кипіння до концентрацій вуглецю близько 0,20% свідчить про високу

температуру металу. При високому перегріванні в області концентрацій вуглецю вище критичних має місце зниження швидкості нагріву металу.

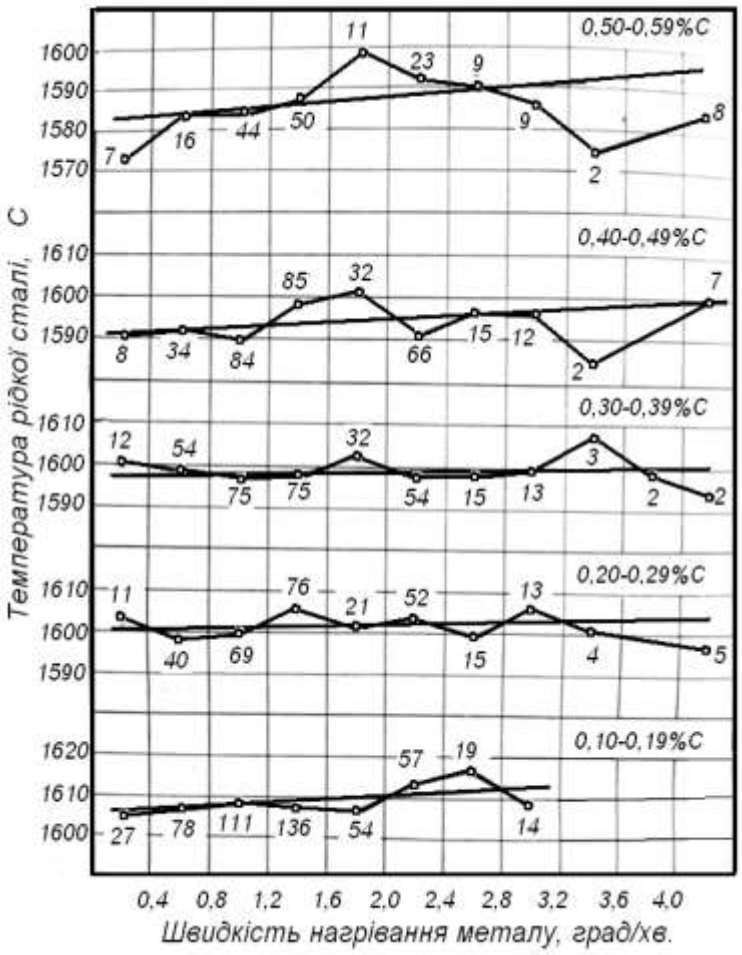


Рисунок 3.12 – Залежність температури рідкої сталі від передуючої швидкості нагріву металу (цифри у точок - число вимірів температури)

3.2.3 Вплив швидкості зневуглецювання на швидкість нагріву металу

Відносно мала різниця температур випромінюючого факела і поверхні ванни в період чистого кипіння обумовлює незадовільні умови передачі тепла ванні. Збільшення швидкості вигорання вуглецю збільшує теплову поверхню ванни, а також коефіцієнт турбулентного теплопереносу. Це призводить до підвищення швидкості нагріву металу.

При цьому представляє певний інтерес оцінити взаємозв'язок швидкостей окислення вуглецю і нагріву металу при різних концентраціях вуглецю відповідні дані представлені на рис. 3.13.

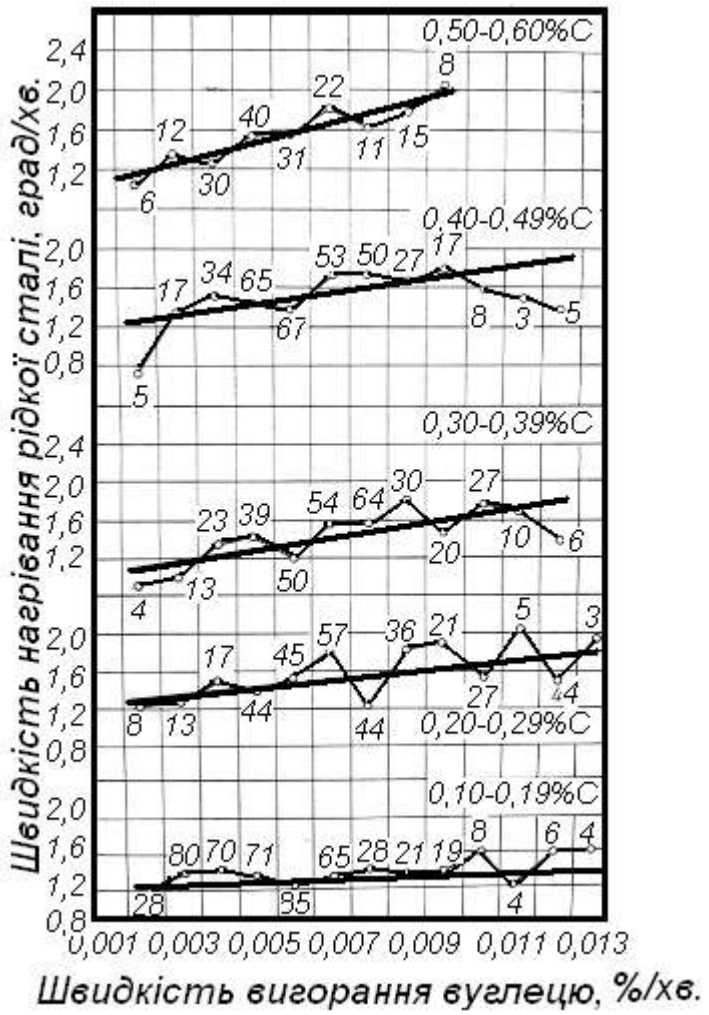


Рисунок 3.13 – Взаємозв'язок швидкостей окислення вуглецю і нагріву ванни при різних концентраціях вуглецю в металі (цифри у точок - число спостережень)

Ці дані свідчать про те, що при середньому і високому вмісті вуглецю зі збільшенням швидкості вигорання вуглецю збільшується швидкість нагріву металу.

Імовірнісний аналіз залежностей швидкості нагріву металу від температури і від швидкості окислення вуглецю (таблиця 3.4) показує, що практично при усіх концентраціях вуглецю залежність швидкості нагріву металу від температури статистично достовірніша, ніж залежність V_t і V_c.

Таблиця 3.4 – Імовірнісний аналіз залежностей і V_t - t і V_t - V_c

Концентрація вуглецю, %	Коефіцієнт кореляції залежності		χ	σ_χ	μ_χ
	$V_t = f(t)$	$V_t = f(V_c)$			
0,10—0,19	-0,252	0,030	0,063	0,022	2,9
0,20—0,29	-0,358	0,126	0,112	0,0372	3,02
0,30—0,39	-0,420	0,196	0,137	0,0402	3,42
0,40—0,49	0,311	0,155	0,074	0,0290	2,56
0,50—0,60	-0,335	0,236	0,056	0,0254	2,20

Слід зауважити, що, як це видно з емпіричних ліній регресії залежності V_t і V_c і вміст 0,30 - 0,49 % С, при високій швидкості зневуглецювання (вище 0,0095-0,01% С/хв.), має місце зниження швидкості нагріву.

На рис. 3.14 представлена залежність можливої швидкості нагріву металу від концентрації вуглецю (при цих швидкостях зневуглецювання). Крива Б показує реальну зміну швидкості нагріву металу при одночасній зміні концентрації вуглецю і швидкості зневуглецювання.

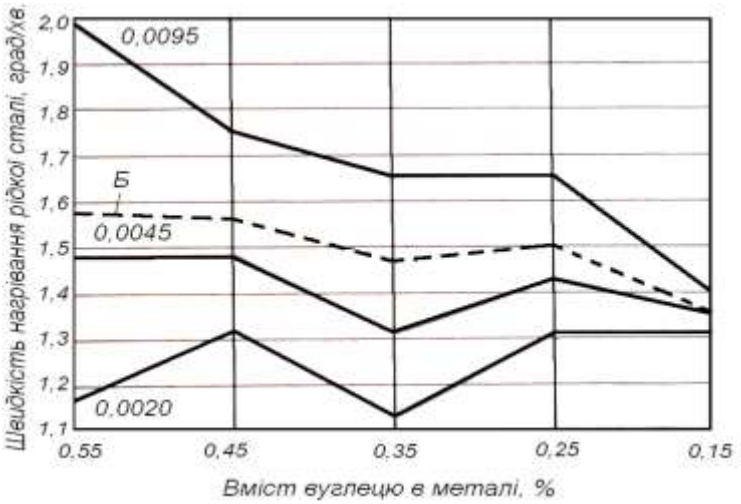


Рисунок 3.14 – Вплив вмісту вуглецю на швидкість нагріву рідкої сталі при різних швидкостях зневуглецювання (цифри у кривих - швидкості зневуглецювання, %/хв.)

Якщо врахувати відмічене явище про зниження швидкості нагріву металу при високих швидкостях окислення вуглецю і його вмісті від 0,30 до 0,49% С, то можна встановити, що найкращі умови з точки зору нагріву металу при концентраціях вуглецю вище критичних мають місце при швидкості окислення вуглецю 0,0045-0,0095 %С/хв. При V_c вище 0,0095 %С/хв. спостерігається значне зниження V_t в процесі зневуглецювання; при V_c нижче 0,0045% С/хв. має місце помітна нерівномірність (зниження і зростання) швидкості нагріву металу.

При вмісті вуглецю в металі нижче критичних швидкість окислення вуглецю має бути вище 0,0020% С/хв. В цьому випадку природним чином дещо знижується швидкість нагріву металу в процесі зневуглецювання (див. рис. 3.14).

Таким чином, з точки зору умов нагріву оптимальними швидкостями окислення вуглецю є:

а) для докритичних концентрацій вуглецю не менше 0,0020 %С/хв.;

б) для концентрацій вуглецю вище за критичних - 0,0045-0,0095 %С/хв.

3.3 Вплив вмісту вуглецю після розплавлення на режим кипіння ванни, якість сталі і продуктивність мартенівських печей

Мінімальний запас вуглецю в металі після розплавлення (у конкретних виробничих умовах) може бути встановлений з урахуванням наступних технологічних і організаційних передумов:

а) необхідної швидкості і міри нагріву металу;

б) швидкості формування шлаку, інтенсивності і глибини видалення шкідливих домішок;

в) інтенсивного і рівномірного впродовж усього періоду кипіння процесу зневуглецювання металу;

г) отримання сталі високої якості;

д) можливості скорочення тривалості плавки за умовами підготовки основного і допоміжного устаткування цеху і т. п.

Обґрунтування мінімально допустимого вмісту вуглецю в металі після розплавлення при виплавці якісної сталі, окрім теоретичного, має велике практичне значення, оскільки дозволить при високій якості сталі підвищити продуктивність мартенівських печей.

У даній роботі розглядається зв'язок між вмістом вуглецю в металі після розплавлення, режимом кипіння ванни, якістю сталі і продуктивністю мартенівських печей.

3.3.1 Методика проведення дослідження

Безпосередньо проведенню дослідних плавок передував значний об'єм статистичних досліджень технологічних і якісних параметрів валових плавок. Методом парної і множинної кореляції встановлювали залежності між вмістом вуглецю в металі після розплавлення і механічними властивостями сталі (подовжні зразки), а також різними технологічними параметрами виплавки (трива-

ліcть періоду кипіння,, інтенсивність зневуглецювання і десульфурації і т. п.) для сталі марок 45 і 10.

Тісноту і достовірність встановленого зв'язку оцінювали коефіцієнтами кореляції r і середньоквадратичними помилками коэфф2циентов кореляції σr Зв'язок вважали статистично достовірним з вірогідністю більше 99%, якщо $\mu = |r|/\sigma_r \geq 2{,}6$.

Парні залежності описували, як правило, рівнянням

$$y = a + bx$$

а множинні - рівнянням

$$x_{1,\,2,\,3\,\ldots\,n} = b_1 + b_2x_2 + \ldots + b_nx_n.$$

Для визначення долі впливу цього чинника в множинному зв'язку на зміну функціональної ознаки розраховували коефіцієнт детермінації, рівний твору парного і парціального коефіцієнтів кореляції після отримання результатів статистичної обробки провели серію дослідних плавок на 250-т мартенівських печах, опалювання - газомазутне. Всього провели близько 50 дослідних плавок стали марок - 65Г, 45 і 10.

Дослідні плавки проводили по двох варіантах. Перший варіант плавки проводили за прийнятою на заводі технологією. По другому варіанту в період завалки знижували витрату чавуну з таким розрахунком, щоб вміст вуглецю в металі після розплавлення був не вищий за 0,50% (фактично - не вище 0,45%) середньомарочний вміст вуглецю. У іншому дослідні плавки по обох варіантах проводили відповідно до прийнятої технології.

Увесь період кипіння плавки ретельно хронометрували. У цей період регулярно відбирали проби металу. Температуру металу заміряли вольфрам молібденовою термопарою занурення. Проби металу для визначення вмісту кисню методом вакуум-плавлення і азоту мокрим методом відбирали з печі роз'ємними сталевими склянками. Проби металу для визначення вмісту водню методом вакуум-нагріву до 850° С відсисали з ложки в кварцові трубки діаметром 5-6 мм.

Для визначення вмісту неметалічних включення методом електролізу і металографії і для проведення механічних випробувань упоперек волокна проби металу відбирали з прокату перерізом 90х90 мм (обтискання менше 3,5) від го-

ловної частини одного зливка другого сифона. Відбір проб робився відповідно до загальноприйнятої методики.

3.3.2 Результати статистичного аналізу якості і технології виплавки плавок

Нині опублікована значна кількість робіт, присвячених статистичному аналізу технологічних, якісних або економічних показників металургійного виробництва, зокрема виробництва стали. При достовірній інформації, що входить, і досить великому її об'ємі статистичний аналіз може стати надійним інструментом для відшукування закономірності металургійних процесів.

На жаль, дослідження з метою визначити раціональний вміст вуглецю після розплавлення при виплавці конструкційних марок сталі на печах цього типу практично відсутні. Тому результати проведеного аналізу представлені нижче досить детально.

Межі коливань і середні значення найголовніших технологічних параметрів, використовуваних при статистичному аналізі, представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Межі коливання (чисельники) і середні значення (знаменники) технологічних параметрів

Технологічний параметр	Умовне позначення	Сталь 45	Сталь 10
Число плавок	-	380	120
Запас вуглецю в металі на кипіння, %	$\Delta[C]$	0,35—1,01 0,60	0,39—1,14 0,61
Середня за період кипіння швидкість окислення вуглецю, %/хв.	V_C	0,0035—0,0125 0,0075	0,0041—0,0105 0,0068
Температура металу перед випуском, ^{0}C	t	1585—1675 1618	1590—1680 1626
Сумарна концентрація оксидів заліза в шлаку перед розкислюванням, %	ΣFeO	5,0—18,5 11,50	6,0—14,5 11,80
Тривалість періоду кипіння, хв.	$\tau_{кіп}$	40—144 78	50—138 87
Швидкість видалення сірки, %/хв.	V_S	0,00015—0,00065 0,00035	0,00015—0,00045 0,00031
Вміст сірки в металі, %:			
після розплавлення	$[S]_р$	0,040—0,060 0,051	0,032—0,063 0,052
у ковшовій пробі	$[S]_к$	0,017—0,038 0,024	0,017—0,036 0,027
Кількість видаленої сірки, %	$\Delta[S]$	0,012—0,039 0,027	0,014—0,037 0,025

Аналіз причин перепризначення плавок. При виплавці сталі в мартенівських печах дуже часто після отримання хімічного аналізу металу першої проби (після розплавлення) доводиться змінювати марку сталі, що виплавляється.

Як видно з приведених даних, головною причиною перепризначення є незадовільний вміст вуглецю в металі після розплавлення. З цієї причини перепризначувало близько 35% усіх плавок (70-80% від числа тих, що усіх перепризначували). Виявлення можливості зниження мінімального вмісту вуглецю після розплавлення повинно зменшити кількість плавок, що перепризначували.

Аналіз головних причин перепризначення плавок приведений в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Аналіз причин перепризначення плавок

Місяць	Кількість плавок, що перепризначували %	Причини перепризначення від загального числа плавок, що перепризначували, %				
		"м'яке" розплавлення	"міцне" розплавлення	висока концентрація сірки	висока концентрація міді	інші
Січень	43,2	44,0	36,0	1,2	-	18,8
Листопад	53,5	40,0	30,0	5,8	4,1	20,1

Механічні властивості сталі. Методом кореляційного аналізу зроблена оцінка впливу найголовніших технологічних чинників періоду кипіння на механічні властивості сталі: запасу вуглецю на кипіння, середньої за період кипіння швидкості окислення вуглецю, сумарної концентрації оксидів заліза, в шлаку перед розкислюванням, температури металу перед випуском.

Відповідні парні рівняння регресії, коефіцієнти кореляції і критерії надійності представлені в таблиці 3.7.

Аналіз даних, приведених в таблиці 3.7, показує, що механічні властивості сталі практично не залежать (у досліджених межах) від вмісту (запасу) вуглецю в металі після розплавлення. Коефіцієнти кореляції парних залежностей малі і статистично недостовірні.

Можна відмітити також, що практично відсутній вплив окисленності шлаку перед розкислюванням на механічні властивості сталі. Також дуже слабким виявився вплив температури на механічні властивості металу.

Таблиця 3.7 – Вплив технологічних чинників на механічні властивості сталі

Марка сталі	Теоретичне рівняння регресії	r	μ
45	$\sigma_т$ = 52,5+0,008Δ [С]	0,03	0,63
10	$\sigma_т$ = 29,90 - 0,99 Δ[С]	-0,05	0,50
45	δ= 22,80+ 0,0002 Δ[С]	0,001	0,02
10	δ = 32,074-2,99 Δ[С]	0,17	1,78
45	φ= 4680+0,018Δ[С]	0,07	1,35
10	φ= 62,504-2,50Δ[С]	0,14	1,44
45	$\sigma_т$ = 53,88—140V_c	-0,05	0,92
10	$\sigma_т$ = 26,59 + 364V_C	0,155	158
45	δ= 21,82 + 264V_C	-0,149	2,98
10	δ= 32,64 + 252V_C	0,145	1,48
45	φ= 46,72 + 154V_c	0,07	1,35
10	φ= 58,74 + 796V_c	0,27	2,88
45	$\sigma_т$ = 50,66+0,128 Σ FeO	0,06	1,14
10	$\sigma_т$ = 32,34 - 0,286 ΣFeO	-0,14	1,44
45	δ= 23,45 + 0,008 ΣFeO	0,005	0.1
10	δ= 26,45 + 0,003 Σ FeO	0	0
45	φ = 46,1 + 0,16 ΣFeO	0,08	1,49
10	φ = 69,84 - 0,49 ΣFeO	-0,17	1,73
45	$\sigma_т$ = -11,86 + 0,04t	0,133	2,61
10	$\sigma_т$ = -37,20 + 0,04t	0,175	1,81
45	δ = 0,45 + 0,0142t	0,08	1,61
10	δ = 40,9 - 0,004t	-0,02	0,23
45	φ = 21,98 + 0,016t	0,08,	1,51
10	φ= 111,52 - 0,029t	-0,163	1,67

Порівняно тісна позитивна залежність виявлена між пластичними властивостями металу і середньою за період кипіння швидкістю окислення вуглецю. Так, наприклад, при виплавці сталі 45 і 10 зв'язок між відносним подовженням, відносним звуженням і швидкістю окислення вуглецю описується наступними статистично достовірними рівняннями регресії:

$$\delta_{45} = 21,82 + 264V_c;\ r = 0,149;\ \mu = 2,98$$

$$\psi_{10} = 58,74 + 796V_c;\ r = 0,27;\ \mu = 2,88.$$

Таким чином, вміст (запас) вуглецю в металі після розплавлення не є чинником, що визначає механічні властивості стали. Очевидно, нижня межа вмісту вуглецю після розплавлення визначатиметься іншими технологічними чинниками (необхідністю за період кипіння нагріву металу до певної температури, видаленням сірки і т. п.).

Температура металу перед випуском. За інших рівних умов готовність металу до випуску з печі визначається, окрім концентрації вуглецю, його температурою.

Не зупиняючись детально на аналізі і залежності теплопоглинання металу від різних технологічних параметрів, нам представляється доцільним встановити вплив на температуру металу перед випуском таких технологічних чинників, як:

а) вміст (запас) вуглецю в металі після розплавлення;

б) середня за період чистого кипіння швидкість окислення вуглецю;

в) тривалість періоду кипіння.

Виявилось, що розглянуті технологічні чинники слабо впливають на температуру металу перед випуском. В той же час можна відмітити, що з підвищенням вмісту (запасу) вуглецю в металі після розплавлення і зі збільшенням тривалості періоду кипіння є деяка тенденція до підвищення температури металу перед випуском:

при виплавці сталі 45:

$t = 1609 + 14{,}8\Delta[C]$; $r = 0{,}12$; $\mu = 2{,}4$;

$t = 1613 + 0{,}06\ \tau_{кіп}$; $r = 0{,}06$; $\mu = 1{,}2$;

при виплавці сталі 10:

$t = 1626 + 1{,}01\Delta[C]$; $r = 0{,}05$; $\mu = 1{,}0$;

$t = 1622 + 0{,}05\ \tau_{кіп}$; $r = 0{,}05$; $\mu = 1{,}04$

Таким чином, уявлення про те, що тільки "міцне" розплавлення забезпечує отримання високої температури металу до кінця плавки, практично не виправдане.

Десульфурація металу. В період кипіння значна увага приділяється процесу видалення сірки. Процес десульфурації сталі протікає в дифузійному режимі і вимагає за інших рівних умов витрати значної кількості часу. В зв'язку з цим, процес десульфурації металу може зробити помітний вплив на тривалість усього періоду кипіння.

Між кількістю видаленої за період кипіння сірки і вмістом сірки в металі після розплавлення, між вмістом сірки в готовій сталі і кількістю видаленої сірки є достовірна кореляційна залежність (рис. 3.15 і 3.16). Аналіз цих залежностей показує, що вміст сірки в металі у момент розплавлення на 38% визначає кількість видаленою за період кипіння сірки (на 62% кількість видаленої чинниками). Кількість видаленої в період кипіння сірки в печі (на 29%) визначає вміст сірки в готовому металі, досить надійно характеризує чистоту готової сталі по сірці.

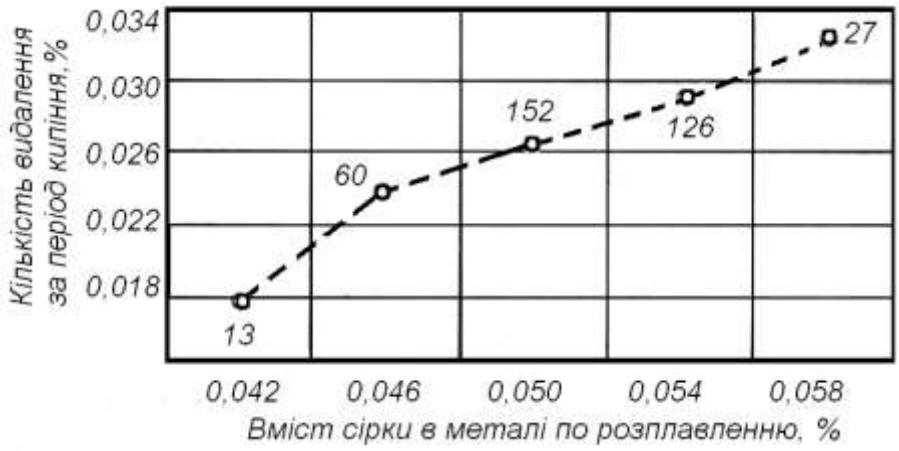


Рисунок 3.15 – Залежність кількості видаленої за період кипіння сірки від вмісту в металі після розплавлення. Сталь 45. $\Delta S = - 0{,}0114 + 0{,}75|S|_p$; r = 0,618; μ = 20.



$[S]_k = 0{,}0364—0{,}445\ \Delta|S|$; r = 0,54; μ = 14,5

Рисунок 3.16 – Залежність вмісту сірки в готовій сталі від кількості сірки, видаленої за період кипіння при виплавці сталі 45

В зв'язку з цим певний інтерес представляє дослідження взаємозв'язку тривалості періоду кипіння і кількості видаленої сірки. Встановлено, що в конкретних умовах проведення роботи тривалість періоду кипіння практично не контролюється процесом десульфурації:

$$\tau_{\text{кип ст. 45}} = 66{,}85 + 501{,}5\ \Delta\ [S];\ r = 0{,}143;\ \mu = 2{,}75.$$

Як видно, зі збільшенням Δ[S] удвічі з 0,016 до 0,032% тривалість періоду кипіння збільшується тільки на 8 хв. Видно, правильніше стверджувати, що з підвищенням тривалості періоду кипіння кількість видаленої сірки дещо підвищується:

$$\Delta[S]_{\text{ст45}} = 0{,}0234 + 0{,}00004\tau_{\text{кип}};\ r = 0{,}143;\ \mu = 2{,}75.$$

Одночасно встановлено, що підвищення запасу вуглецю в металі після

розплавлення викликає лише незначне підвищення кількості видаленої сірки :

$$\Delta[S]_{ст45} = 0{,}0260 + 0{,}0013\ \Delta\ |C|;\ r = 0{,}04;\ \mu = 1.$$

Останнє рівняння статистично недостовірне, що ще раз вказує на те, що процес десульфурації за даних умов виплавки сталі практично не чинить впливу на тривалість періоду кипіння.

Значний інтерес представляє дослідження впливу деяких технологічних чинників на швидкість видалення сірки.

Як і виходить з теорії, збільшення швидкості окислення вуглецю, обумовлюючe підвищення коефіцієнта турбулентної дифузії і зменшення товщини неперемішуваного шару, призводить до підвищення швидкості видалення сірки з металу (рис. 3.17):

$$V_{Sст10} = 0{,}0023 + 0{,}0103V_c;\ r = 0{,}214;\ \mu = 2{,}25.$$

$$V_{Sст45} = 0{,}00022 + 0{,}0169V_c;\ r = 0{,}263;\ \mu = 5{,}37.$$



•---• - сталь 10; ○---○ - сталь 45

Рисунок 3.17 – Вплив швидкості окислення вуглецю
на швидкість видалення сірки

Проте середня за період кипіння швидкість видалення сірки зі збільшенням запасу вуглецю в металі після розплавлення помітно знижується:

$$V_{S\ ст.\ 10} = 0{,}00046 - 0{,}00025\Delta[C];\ r = -\ 0{,}42;\ \mu = -\ 5{,}12;$$

$$V_{S\ ст.\ 45} = 0{,}00052 - 0{,}00028\Delta[C\ ];\ r = -\ 0{,}38;\ \mu = 8{,}44.$$

Зниження V_S з ростом $\Delta[C]$ пов'язано з істотним подовженням періоду кипіння при збільшенні вмісту вуглецю в металі після розплавлення і збільшен-

ня при цьому витрати залізняку. Як було показано, зі збільшенням запасу вуглецю на кипіння кількість видаленої сірки практично не збільшується.

Методом множинної кореляції досліджували спільний вплив швидкості окислення вуглецю, вмісту (запасу) вуглецю, кількості видаленої сірки, окисленості шлаку перед розкислюванням (дані про основність шлаку, на жаль, відсутні) на середню за період кипіння швидкість десульфурації металу при виплавці сталі 45:

$$V_S = 0{,}00006 + 0{,}035\ V_c + 0{,}0082\ \Delta[S] — 0{,}00043\ \Delta[C] + 0{,}000005\ \Sigma FeO;\ R = 0{,}84.$$

Частка впливу (коефіцієнт детермінації) технологічних чинників на швидкість десульфурації оцінюється: кількістю видаленої сірки - 32,8%; запасом вуглецю - 23,5%; швидкістю окислення вуглецю - 14,2%; окисленістю шлаку - 0,1%. Сумарний вплив даних чинників на V_S - 70,6%.

Таким чином, статистичним аналізом встановлено, що в конкретних виробничих умовах процес десульфурації протікає досить інтенсивно і практично не впливає на тривалість періоду кипіння.

Тривалість періоду кипіння і швидкість окислення вуглецю. Статистичним аналізом встановлено, що вміст (запас) вуглецю в металі після розплавлення значною мірою визначає тривалість періоду кипіння (рис. 3.18, а). З рисунка видно, що підвищення запасу вуглецю практично лінійно підвищує тривалість періоду кипіння:

$$\tau_{кип\ ст.\ 45} = 39 + 70{,}8\ \Delta[C];\ r = 0{,}533;\ \mu = 13{,}3;$$

$$\tau_{кип\ ст.\ 10} = 37 + 84{,}65\ \Delta[C];\ r = 0{,}69;\ \mu = 14{,}3.$$

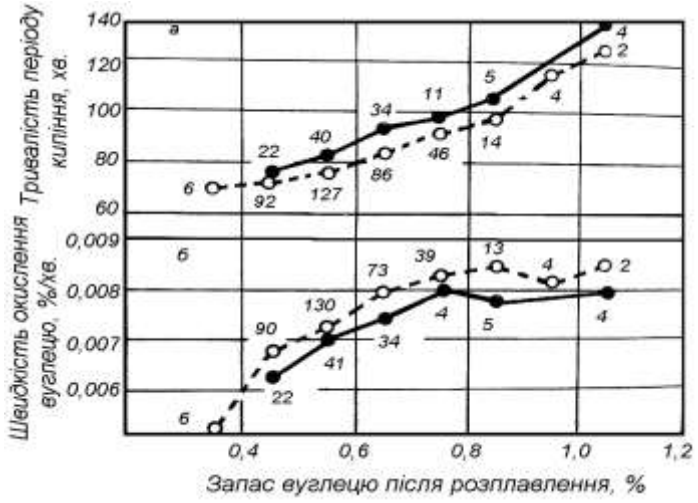


Рисунок 3.18 – Вплив вуглецю в металі після розплавлення на тривалість періоду кипіння (а) і середню за період кипіння швидкість окислення вуглецю (б)

З іншого боку, тривалість періоду кипіння, природно, залежить від інтенсивності процесу зневуглецювання (рис. 3.18, 3.19), збільшення швидкості окислення вуглецю значною мірою скорочує тривалість періоду кипіння. У припущенні лінійності, ці залежності описуються наступними рівняннями регресії :

$$\tau_{кип\ ст.\ 45} = 114 - 4460V_C;\ r = -0{,}372;\ \mu = 7{,}8;$$

$$\tau_{кип\ ст.\ 10} = 119 - 4360V_C;\ r = -0{,}352;\ \mu = 4{,}33.$$



•---• - сталь 10; ○---○ - сталь 45

Рисунок 3.19 – Залежність тривалості періоду кипіння від швидкості окислення вуглецю

Методом множинної кореляції зроблена оцінка залежності тривалості періоду кипіння від вмісту (запасу) вуглецю після розплавлення і середньої за період кипіння швидкості окислення вуглецю :

$$\tau_{кип\ ст.\ 45} = 81 - 8640V_C + 108\Delta[C];\ R = 0{,}85;$$

$$\tau_{кип\ ст.\ 10} = 83 - 9120V_C + 115\Delta[C];\ R = 0{,}95.$$

Частка впливу $\Delta[C]$ і V_c на $\tau_{кіп}$ представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Частка впливу технологічних чинників на тривалість періоду кипіння

Технологічні параметри	Коефіцієнти детермінації, %	
	Сталь 45	Сталь 10
Вміст (запас) вуглецю в металі після розплавлення	42	67,5
Середня за період кипіння швидкість окислення вуглецю	28,6	25
Сумарний вплив Δ[C] і V_c на $\tau_{кіп}$	70,6	92,5

З приведених даних видно, що доля впливу запасу вуглецю на тривалість періоду кипіння істотно вище долі впливу швидкості окислення вуглецю, тобто тривалість періоду кипіння більшою мірою визначається величиною Δ[C] і у меншій мірі залежить V_c.

Вміст (запас) вуглецю в металі після розплавлення визначає як тривалість періоду кипіння, так і середню за період швидкість окислення вуглецю (рис. 3.18, б). Збільшення швидкості зневуглецювання при збільшенні вмісту вуглецю в металі після розплавлення можна пояснити підвищенням витрати залізняку в перші моменти періоду кипіння. В той же час слід зазначити, що при підвищенні запасу вуглецю понад 0,60-0,70% швидкість окислення вуглецю практично не збільшується. Це вказує на те, що присадки руди можуть інтенсифікувати процес зневуглецювання не нескінченно. При якійсь інтенсивності присадок твердих окисників швидкість окислення не підвищується або навіть знижується внаслідок пониження температури металу і його перегрівання над температурою ліквідусу. Більше того, ці дані дозволяють стверджувати, що для подібних умов верхня межа запасу вуглецю на кипіння не повинна перевищувати 0,6-0,7%. Окислення надмірного понад цю кількість вуглецю помітно підвищує тривалість періоду кипіння (збільшення кута нахилу кривих до абсциси, рис. 2.19, а).

Таким чином, тривалість періоду кипіння визначається в першу чергу вмістом (запасу) вуглецю в металі після розплавлення. З іншого боку, встановлено, що температура металу перед випуском, механічні властивості стали, чистота сталі по сірці практично не залежать від запасу вуглецю. Ці результати представляються дуже важливими. Може виявитися, що, підвищуючи запас вуглецю в металі після розплавлення, ми лише подовжуємо плавку, не покращуючи якості сталі. Верхня межа запасу вуглецю на кипіння для конкретних умов не повинна перевищувати 0,6-0,7%.

3.3.3 Результати дослідних плавок

Усереднені результати дослідних плавок трьох марок сталі (65Г, 45 і 10) представлені в таблиці 3.9. Нижче даний аналіз результатів дослідних плавок.

Таблиця 3.9 – Деякі усереднені показники технології виплавки і якості сталі

Показники	Сталь 65Г		Сталь 45		Сталь 10	
	варіант I	варіант II	варіант 1	варіант II	варіант I	варіант II
Число плавок	9	11	9	10	5	4
Вміст вуглецю після розплавлення, %	1,19	1,05	1,07	0,83	0,72	0,44
Запас вуглецю, %	0,54	0,40	0,62	0,38	0,62	0,34
Швидкість окислення вуглецю, %/хв.:						
за період кипіння;	0,0069	0,0064	0,0072	0,0076	0,0073	0,0067
за період чистого кипіння	0,0067	0,0059	0,0068	0,0071	0,0042	0,0036
Тривалість, хв.:						
періоду кипіння	104	90	100	67	97	42
періоду чистого кипіння	40	37	43	32	65	30
усієї плавки	401	372	392	387	426	367
Витрата залізняку, кг	590	460	700	255	700	205
Витрата вапна, кг	980	920	890	580	1140	800
Температура металу перед випуском, °С	1610	1612	1630	1615	1627	1612
Швидкість нагріву металу в період чистого кипіння, град/хв.	1,32	1,721	1,28	1,35	1,47	1,13
Склад шлаку перед розкислюванням, %						
ΣFeo	18,9	16,9	18,9	17,6	20,6	20,2
MnO	5,4	5,7	5,5	6,4	5,8	8,2
CaO	44,8	44,8	45,0	43,2	41,8	39,0
SiO_2	14,5	15,5	15,5	16,0	15,2	14,6
Основність CaO/SiO_2	3,12	2,88	2,98	2,73	2,79	2,67
Швидкість наростання основності, од/год	0,85	0,95	0,78	1,02	0,66	1,00
Вміст сірки, %:						
після розплавлення	0,054	0,052	0,052	0,051	0,063	0,052
у ковшовій пробі	0,026	0,026	0,025	0,028	0,028	0,029
Вміст фосфору, %						
після розплавлення	0,034	0,034	0,032	0,030	0,031	0,032
у ковшовій пробі	0,018	0,020	0,018	0,016	0,018	0,018
Швидкість видалення сірки, %S/хв.	0,00029	0,00030	0,00028	0,00037	0,00027	0,00033
Вміст неметалічних включення, %	0,0031	0,0032	0,0028	0,0029	0,0030	0,0033
Оксиди, бал	1,42	1,41	1,48	1,59	1,82	1,85
Сульфіди, бал	1,98	1,70	2,58	1,98	1,50	1,48
Вміст водню, $см^3/100$ т						
перед розкислюванням	4,42	2,62	3,04	4,15	-	-
випуском	5,70	5,42	5,36	5,87	-	-
Вміст азоту; %:						
перед розкислюванням	0,007	0,009	0,0044	0,0056	0,0065	0,0044
перед випуском	0,0041	0,004	0,0062	0,0039	0,0050	0,0040
Механічні властивості на поперечних зразках:						
σ_b, $кГ/мм^2$	-	-	68,4	71,1	43,8	43,8
$\sigma_т$, $кГ/мм^2$	-	-	39,1	40,8	28,6	30,6
δ, %	-	-	17,9	17,7	30,7	34,4
φ, %	-	-	32,0	33,7	63,8	64,8
$a_н$, $кГм/см^2$	-	-	4,76	4,89	12,68	13,0
Схильність сталі до механічного старіння (поперечні зразки), %	-	-	54,5	56,7	56,0	55,8
Продуктивність, т/год	11,0	11,8	11,0	11,4	10,45	12,15
Витрата чавуну, кг/т	342	328	346	315	295	290

Тривалість періодів кипіння і чистого кипіння. Статистичним аналізом встановлено, що збільшення запасу вуглецю в металі після розплавлення значно подовжує період кипіння. Це добре підтверджується дослідними плавками (рис. 3.20). Збільшення запасу вуглецю в металі з 0,30- 0,40% до 0,70-0,80% майже в два рази подовжує період кипіння.

Звертає на себе увагу той факт, що тривалість періоду чистого кипіння в малій мірі залежить від запасу вуглецю в металі після розплавлення. Це стає зрозумілим, якщо врахувати (це буде показано нижче), що зі збільшенням Δ[С] значною мірою збільшується кількість досаджуваного у ванну залізняку і вапна, що помітно подовжує період рудного кипіння і наведення шлаку.

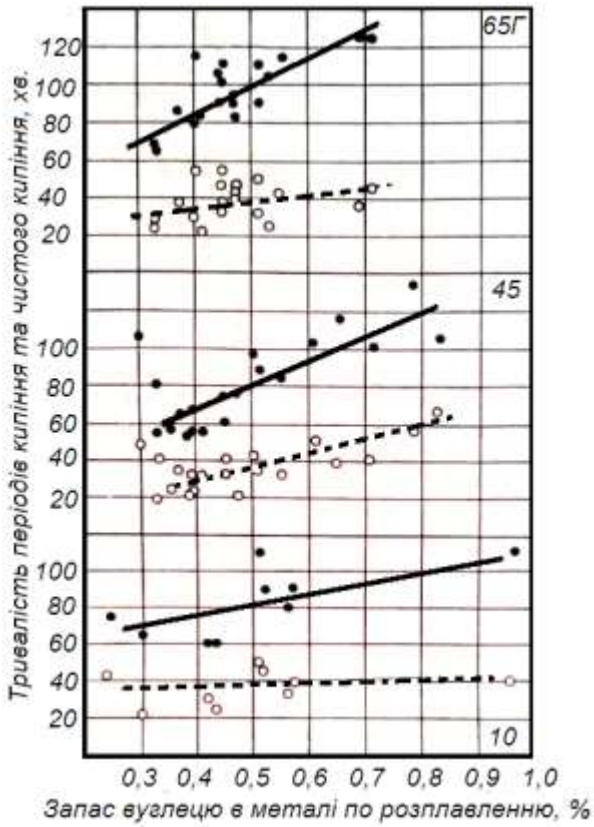


Рисунок 3.20 – Вплив вмісту (запасу) вуглецю в металі після розплавлення на тривалість періоду кипіння (●) і чистого кипіння (○)

Витрата залізняку і вапна. Підвищення запасу вуглецю в металі після розплавлення істотно збільшує витрату залізняку, що вводиться у ванну в поліровку (рис. 3.21). Підвищення запасу вуглецю в два рази збільшує витрату залізняку на плавку приблизно в три рази.

Як видно з табл. 3.9, зі збільшенням запасу вуглецю в металі після розп-

лавлення збільшується не лише витрата окисників, але помітно підвищується витрата вапна для наведення шлаку в період кипіння.

Умови формування шлаку. Дані, представлені в табл. 3.9, показують, що склад шлаку перед розкислюванням практично не залежить від вмісту вуглецю в металі після розплавлення. При цьому можна відмітити, що на плавках зі зниженим запасом вуглецю на кипіння дещо нижче основність шлаку перед розкислюванням. Це пов'язано з меншою витратою вапна для наведення шлаку. Проте середня за період кипіння швидкість наростання основності на цих плавках вища, що вказує на високу швидкість і сприятливі температурні умови шлакоутворення.

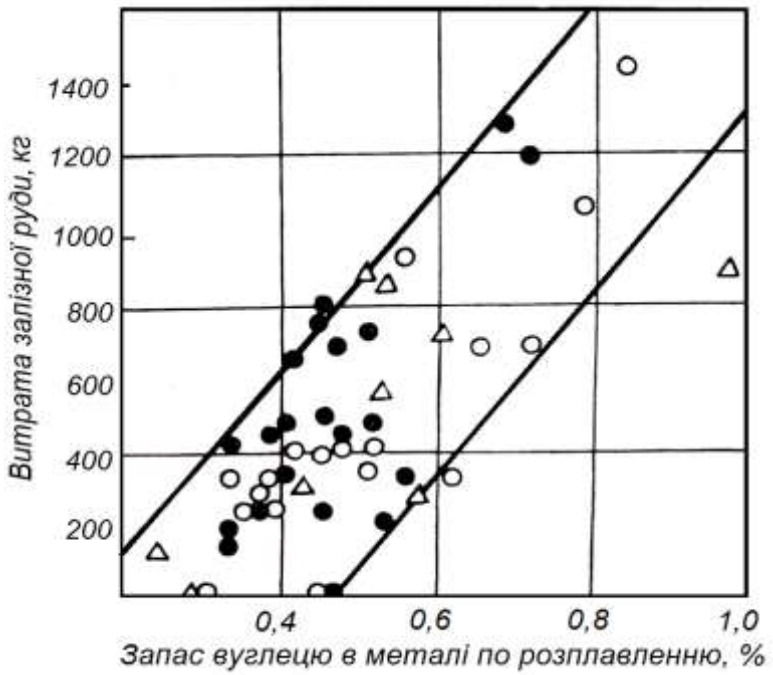


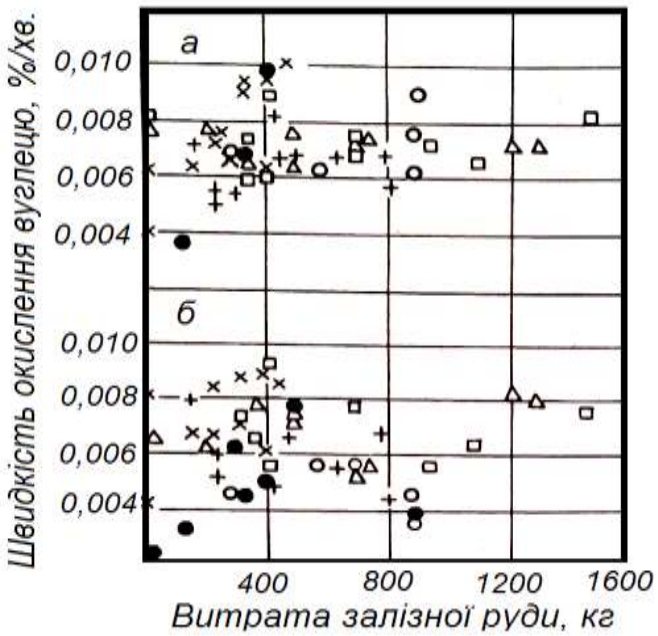
Рисунок 3.21 – Залежність витрати залізняку в поліровку від запасу вуглецю на кипіння: ● - сталь 45Г; ○ - сталь 45; Δ - сталь 10

Швидкість і глибина видалення шкідливих домішок. В середньому вміст шкідливих домішок (сірки, фосфору) в металі після розплавлення практично однаковий для обох варіантів технології виплавки (див. табл. 2.9). Практично однаковою є і чистота готової сталі по цих елементах. Отже, кількість видалених за період кипіння домішок не залежить від вмісту вуглецю в металі після розплавлення, якщо врахувати, що склад шлаку перед розкислюванням металу в печі не визначається запасом вуглецю. При цьому слід зазначити, що в результаті інтенсивного шлакоутворення (швидкості наростання основності) швидкість видалення сірки на плавках зі зниженим запасом вуглецю вище, ніж на порівняль-

них плавках.

Швидкість окислення вуглецю. Швидкість окислення вуглецю є одним з найважливіших технологічних параметрів плавки, що значною мірою впливає на тривалість періоду кипіння і якість сталі (зокрема, вміст водню перед розкислюванням металу).

Представляє значний інтерес оцінити вплив витрати залізняку на швидкість окислення вуглецю (рис. 3.22).



а - швидкість окислення вуглецю за період кипіння;

б - швидкість окислення вуглецю за період чистого кипіння.

Плавки по першому варіанту: □ - сталь 45; Δ- сталь 65Г; ○ - сталь 10;

плавки по другому варіанту: × - сталь 45; ▲- сталь 65Г; ● - сталь 10

Рисунок 3.22 – Залежність швидкості окислення вуглецю
від витрати залізняку на плавку

Як видно з обговорюваного рисунка, збільшення витрати залізняку приблизно до 400 кг дещо підвищує швидкість окислення вуглецю. Проте подальше підвищення витрати руди не лише не збільшує, але навіть дещо знижує V_c, особливо в період чистого кипіння (див. рис. 3.22, б).

Це пов'язано, ймовірно, з помітною дією залізняку, що охолоджує. Пониження перегрівання металу над ліквідусом утрудняє протікання процесу зневуглецювання.

Як видно з табл. 3.9, швидкість окислення вуглецю в цілому за період окислення при виплавці сталі 65Г і 10 вище на плавках по першому варіанту. На плавках же сталі 45 по другому варіанту швидкість окислення вуглецю вища, ніж на плавках по першому варіанту. В той же час швидкості окислення вуглецю в період чистого кипіння при виплавці сталі цих марок відрізняються у меншій мірі, чим середні швидкості в цілому за період кипіння. Це підтверджує також хід кінетичних кривих окислення вуглецю у кінці кипіння; кут нахилу кривих відрізняється у меншій мірі, чим в початкові стадії кипіння.

Слід зазначити, що з підвищенням концентрації вуглецю в металі після розплавлення дещо збільшується нерівномірність ходу кінетичних кривих окислення вуглецю. На кривих з'являються майданчики з малим кутом нахилу до осі абсцис, що вказує на зниження інтенсивності кипіння і на утруднення умов дегазації металу.

Швидкість нагріву металу. Температура металу перед випуском. Відповідні усереднені дані приведені в табл. 3.9.

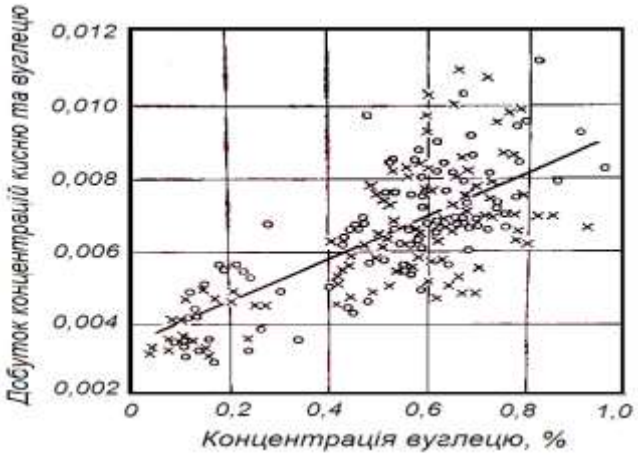
Як видно з приведених даних, температура металу перед випуском при виплавці сталі 10 і 45 дещо нижче на плавках, проведених по другому варіанту. При виплавці сталі 65Г температура металу на випуску практично однакова для обох варіантів виплавки. Проте у будь-якому випадку температура металу перед випуском відповідала вимогам і забезпечувала якісне розливання; більше того, при підвищених концентраціях вуглецю після розплавлення з'являється небезпека отримання до кінця періоду кипіння перегрітого металу.

Можна відмітити, що швидкість нагріву металу за даних умов роботи мартенівських печей досить висока. При цьому швидкість нагріву металу в період чистого кипіння на плавках, проведених по другому варіанту, навіть дещо (за винятком сталі 10; проте по цьому варіанту виявилося мало даних) вища. Це вказує на можливість при досить інтенсивному кипінні нагрівати метал порівняно за короткий проміжок часу.

Окисленність металу в період чистого кипіння. Неодноразово встановлено, що окисленність металу в період кипіння значною мірою регулюється концентрацією вуглецю. У цій роботі підтверджений високий зв'язок концентрацій

кисню і вуглецю (рис. 3.23). При цьому дані, що відносяться до плавок, виплавлених з різним запасом вуглецю на кипіння, розташовуються приблизно в однаковій зоні розсіяння. Якого-небудь переважного розташування точок не спостерігається.

У припущенні, що зміни вмісту вуглецю і кисню на плавках обох варіантів підкоряються однаковим закономірностям, зв'язок між концентрацією кисню і вуглецю статистично достовірно описується наступним рівнянням регресії, що добре узгоджується з наявними даними: $[O]\cdot[C] = 0{,}0034 + 0{,}0058\ [C]$; $r = 0{,}61$; $\mu = 13{,}5$.



○ - плавки по першому варіанту; × - плавки по другому варіанту

Рисунок 3.23 – Залежність твору концентрацій кисню і вуглецю від концентрації вуглецю

Методом парної і множинної кореляції оцінили вплив деяких технологічних чинників на окисленність киплячого металу. При цьому вплив технологічних чинників на окисленність металу розглядали в двох концентраційних по вуглецю інтервалах (табл. 3.10): в інтервалі концентрацій вуглецю менше 0,35 і більше 0,36% (приблизно при цій "критичній" концентрації вуглецю відбувається перелом на кривій залежності швидкості зневуглецювання від концентрації вуглецю).

Таблиця 3.10 – Залежність окисленності металу від технологічних чинників

Технологічний чинник	Рівняння парної регресії	r
Інтервал 0,08-0,35% С		
Концентрація вуглецю	$[O] = 0{,}0447 - 0{,}096\ [C]$	0,796
Температура металу	$[O] = 0{,}3870 + 0{,}000257\ t$	0,673
Швидкість зневуглецювання	$[O] = 0{,}0329 - 1{,}075\ V_c$	- 0,487
Інтервал 0,36-0,96% С		
Концентрація вуглецю	$[O] = 0{,}0182 - 0{,}0104\ [C]$	- 0,440
Температура металу	$[O] = 0{,}0488 + 0{,}0000375\ t$	0,305
Швидкість окислення вуглецю	$[O] = 0{,}0109 + 0{,}108\ V_c$	0,154

При цьому встановлено, що окисленність шлаку навіть у вужчих концентраційних інтервалах по вуглецю практично не впливає на окисленність металу.

Як видно з табл. 3.10, найбільш високе значення коефіцієнта кореляції має місце для залежності [O]—[C].

Для усунення супутнього впливу технологічних чинників на окисленність металу доцільно розглянути рівняння множинної кореляції :

у інтервалі 0,36-0,95% C:

$$[O] = - 0{,}0183 - 0{,}0091\ [C] + 0{,}0000223\ t - 0{,}0089\ V_c\ ;$$

у інтервалі 0,08-0,35% C:

$$[O] = - 0{,}1172 + 0{,}074\ [C] + 0{,}0000985\ t + 0{,}040\ V_c.$$

Коефіцієнти множинної кореляції - 0,51 і 0,82 відповідно. У табл. 3.11 приведений розрахунок долі впливу (коефіцієнта естермінації) технологічних чинників на окисленність металу.

Таблиця 3.11 – Частка впливу технологічних чинників на окисленність металу

	Коефіцієнт детермінації, %	
Технологічний чинник	інтервал 0,8-0,35% C	інтервал 0,36-0,95% C
Концентрація вуглецю Температура металу Швидкість зневуглецювання	50,80 17,50 -1,0	20,60 5,60 -0,2
Сумарний вплив трьох технологічних чинників на окисленність металу	67,30	26,00

Приведені дані вказують на те, що доля впливу концентрації вуглецю на окисленність металу істотно вище за долю впливу інших технологічних чинників. При цьому в процесі зневуглецювання, при пониженні концентрації вуглецю, вплив технологічних чинників на окисленність металу істотно збільшується.

Запас вуглецю в металі і якість сталі. Для визначення якості металу досліджували: вміст неметалічних включень, визначених в прокаті методом електролізу (середнє з двох визначень) і методом металографії (середній максимальний бал за шістьма зразками); вміст газів; механічні властивості подовжніх і поперечних зразків при кімнатній температурі; ударну в'язкість при негативних температурах; схильність сталі до механічного старіння, макроструктуру сталі.

Відповідні усереднені дані представлені в табл. 3.9.

1. Вміст неметалічних включення. Звертає на себе увагу факт досить низького вмісту в металі стійких неметалічних включень, виділених електролізом. З цим добре узгоджується середній максимальний бал оксидних включень.

Низька забрудненість сталі являється, ймовірно, наслідком відпрацьованості технології виплавки і розливання стали.

Аналіз даних про неметалічних включення показує, що, незважаючи на дещо великі межі коливання вмісту стійких оксидних включень на плавках зі зниженим запасом вуглецю на кипіння на сталі 45 і 65Г, середні значення загальної кількості оксидних включень, а також значення середнього максимального балу оксидів і сульфідів для обох варіантів технології виплавки практично однакові. Спроба відшукування забрудненості, металу від найголовніших технологічних параметрів періоду кипіння (Δ[C], $\tau_{кіп}$, $\tau_{чистий.\ кіп}$, V_C, Σ(FeO), t) не увінчалася успіхом. Кореляційні поля парних залежностей вмісту неметалічних включення від технологічного параметра вказували на практичну відсутність яких-небудь достовірних закономірностей.

2. Вміст газів. При проведенні дослідження не ставили метою встановити нові або підтвердити старі закономірності поведінки водню і азоту.

У табл. 3.9 представлені усереднені дані про вміст водню і азоту в металі перед розкислюванням і випуском.

Аналіз наявних даних про вміст газів в металі показує, що поведінка водню і азоту на плавках обох варіантів аналогічно, а середні значення газів по окремих періодах практично співпадають.

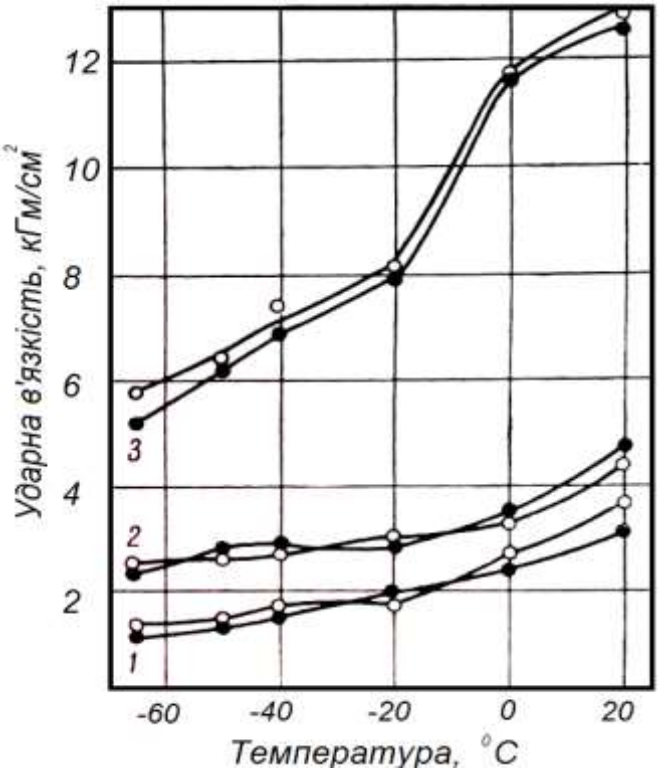
3. *Механічні властивості сталі.* У табл. 3.9 представлені усереднені дані про механічні властивості сталі на поперечних зразках.

Аналіз наявних даних показує, що механічні властивості стали плавок другого варіанту на поперечних зразках, як правило, дещо вищі за механічні властивості сталі з "нормальним" вмістом (запасом) вуглецю після розплавлення. Це побічно ще раз вказує на те, що забрудненість сталі неметалічними включення, а також вміст газів, особливо водню, на дослідних плавках не вище, ніж на звичайних.

Зроблена спроба відшукування закономірностей зміни механічних властивостей на поперечних зразках залежно від запасу вуглецю на кипіння, швид-

кості його окислення, забрудненості сталі неметалічними включення успіхом не увінчалася. Проте можна відмітити, що з ростом середньої швидкості окислення вуглецю як за період кипіння, так і за період чистого кипіння дещо збільшується ударна в'язкість сталі 45.

4. *Ударна в'язкість сталі при негативних температурах.* Метою цієї роботи було не відшукування способів підвищення ударної в'язкості при знижених температурах, а порівняння ударної в'язкості сталі, виплавленої з різним запасом вуглецю перед періодом кипіння, при негативних температурах (рис. 3.24).



1 - сталь 10; 2 - сталь 45; 3 - сталь 65Г;

• - • плавки по першомуваріанту; ○---○ плавки по другому варіанту

Рисунок 3.24 – Залежність ударної в'язкості сталі від температури випробування

Аналіз цих даних показує, що ударна в'язкість сталі незалежно від варіанту технології виплавки (різного запасу вуглецю на кипіння) практично рівноцінна. Можна відмітити також, що ударна в'язкість сталі при температурі мінус 65° С не залежить, як це показують кореляційні поля залежності $a_н$ - Δ[С], від запасу вуглецю на кипіння.

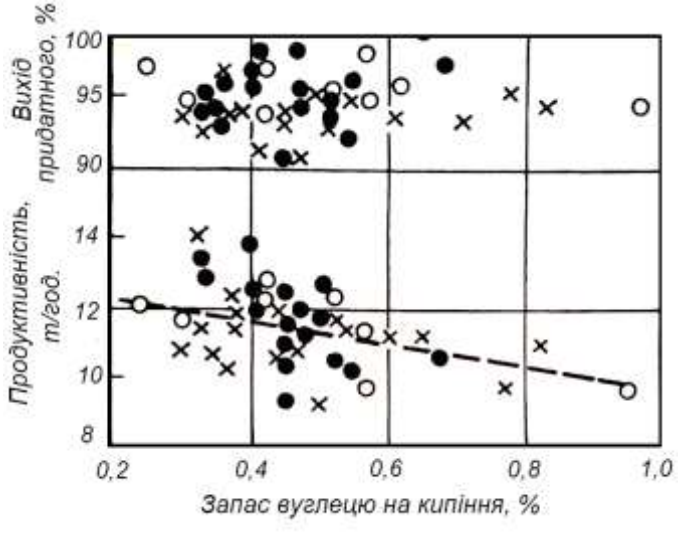
5. *Схильність сталі до механічного старіння.* Чутливість сталі до механічного старіння оцінювали зміною ударної в'язкості металу, підданого старінню,

в порівнянні з його ударною в'язкістю в початковому стані (див. табл. 3.9).

Аналіз наявних даних показує, що схильність сталі до механічного старіння для обох варіантів технології практично однакова. Спроба відшукування закономірності зміни ударної в'язкості після старіння при зміні запасу вуглецю на кипіння не увінчалася успіхом.

6. *Макроструктура сталі.* Макроструктуру сталі контролювали в головній і хвостовій частинах прокату перерізом 90х90 мм від одного зливка другого сифона. Макроструктура усіх плавок, виплавлених по обох варіантах, відповідала пред'явленим їй вимогам.

Деякі показники роботи мартенівських печей. Таким чином, статистичним аналізом встановлена принципова можливість деякого зниження запасу вуглецю на кипіння в порівнянні з вимогою технологічної інструкції. Проте зниження запасу вуглецю на кипіння є не самоціллю. Зниження запасу вуглецю на кипіння і пов'язаної з ним витрати залізняку і вапна дозволяє при високій якості металу скоротити тривалість плавки, підвищити продуктивність мартенівських печей, понизити питому витрату чавуну і зменшити вірогідність отримання до випуску надмірно перегрітого металу (рис. 3.25, 3.26; табл. 3.9).



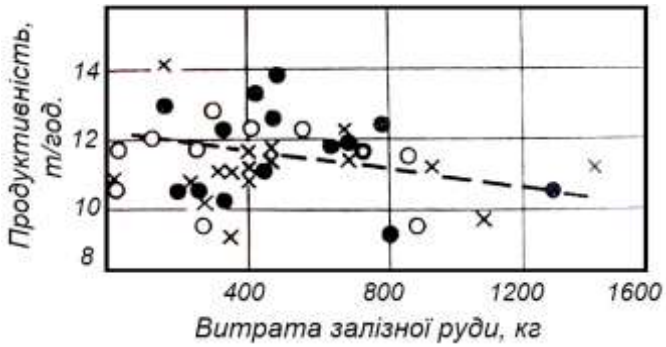
○ - сталь 10; х - сталь 45; ● - сталь 65Г

Рисунок 3.25 – Залежність годинної продуктивності мартенівських печей і виходу придатного від запасу вуглецю в металі на кипіння

Таким чином, виплавка сталі за технологією зі зниженим запасом вуглецю на кипіння дозволяє в конкретних умовах експериментів при високій якості

металу досягти:

1) зниження тривалості плавки на 10-59 хв.;



○ - сталь 10; х - сталь 45; ● - сталь 65Г

Рисунок 3.26 – Залежність годинної продуктивності мартенівських печей від витрати залізняку в поліровку

2) підвищення годинної продуктивності мартенівських печей на 0,4-1,7 т;

3) зниження питомої витрати чавуну на 5-31 кг/т;

4) зниження витрати залізняку для окислення надмірного вмісту вуглецю на 130-495 кг на плавку;

5) зниження витрати вапна для наведення нового шлаку на 60-340 кг за плавку.

На жаль, відсутні дані про питому витрату палива. Проте можна припустити, що витрата палива на 1 т сталі не збільшиться внаслідок скорочення тривалості плавки.

Регламентація присадок залізняку. Наявні дані дозволяють оцінити справедливість вимоги технологічних інструкцій про обов'язковість значних (більше 0,5% від маси садки) присадок залізняку в поліровку при виплавці якісної сталі.

В результаті досліджень встановлено:

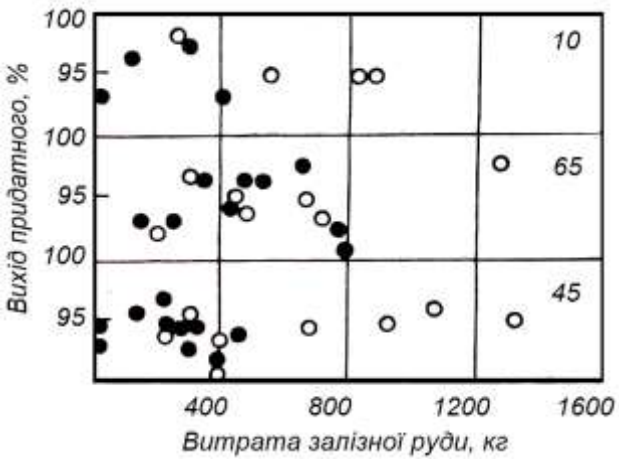
1) збільшення присадки залізняку в період поліровки, пов'язане з підвищеним вмістом вуглецю в металі після розплавлення, не покращує чистоти сталі по фосфору (див. табл. 3.9);

2) підвищення витрати залізняку більше 350-400 кг на плавку (див. рис. 3.22) не збільшує інтенсивності зневуглецювання;

3) збільшення витрати залізняку від 0 до 1300 кг в період поліровки не збільшує вихід придатного (рис. 3.27);

4) збільшення витрати залізняку помітно знижує годинну продуктив-

ність мартенівських печей (див. рис. 3.26).



● - плавки по першому варіанту; ○ - плавки по другому варіанту

Рисунок 3.27 – Зв'язок виходу придатного з витратою залізної руди в поліровку

Таким чином, отримані дані дозволяють стверджувати, що процес виплавки сталі доцільно вести так, щоб уникнути значних присадок залізняку в поліровку (не більше 0,5% від маси садки), що охолоджують ванну, знижують інтенсивність зневуглецювання в період чистого кипіння і мартенівських печей, що знижують продуктивність.

Це досягається відповідною шихтовкою. При великому запасі вуглецю для швидшого окислення надлишку вуглецю досаджують значну кількість залізняку.

Проте отримувані результати протилежні бажаним. На кінетичних кривих окислення вуглецю, як вже відзначалося, з'являються майданчики, що вказують на зниження інтенсивності кипіння і погіршення пов’язаного з ним процесу дегазації сталі.

Мінімальний вміст вуглецю в металі після розплавлення. Проведене дослідження дозволяє дати відповідь на питання про мінімальний вміст вуглецю в металі після розплавлення: мінімальний запас вуглецю в металі після розплавлення для цих умов виробництва може бути понижений до 0,35%. При цьому слід виходити з наступного:

а) окисленність киплячого металу визначається головним чином концентрацією вуглецю і не залежить від запасу вуглецю на кипіння;

б) інтенсивність зневуглецювання ванни, що значною мірою визначає вміст газів в металі в період чистого кипіння, практично не залежить від вмісту вуглецю в металі після розплавлення;

в) в конкретних умовах шлакоутворення, протікаючи інтенсивно, забезпечує при окисленні 0,30-0,35% С отримання металу до кінця періоду кипіння з низьким вмістом сірки і фосфору;

г) теплова потужність досліджуваних мартенівських печей забезпечує високі швидкості нагріву металу. Окислення 0,30-0,35% С дозволяє досягти необхідної температури сталі перед випуском;

д) якість металу, що виплавляється за технологією із запасом вуглецю 0,30-0,35%, не нижче за якість стали, що виплавляється за технологією із запасом вуглецю, вимогам технологічної інструкції, що відповідають;

е) зниження запасу вуглецю менше 0,30% С викликає утруднення в проведенні технологічних операцій і нагріві металу до необхідної температури випуску: плавки проводяться з присадками феромарганцю. При цьому період кипіння подовжується;

ж) отримання після розплавлення металу з вмістом вуглецю, що перевищує задане більш ніж на 0,70%, небажано;

з) запас вуглецю, рівний 0,35-0,65%, дозволяє спокійно проводити період кипіння. Час, впродовж якого окислюється цей запас вуглецю (60- 80 хв.), досить для проведення усіх технологічних операцій - скачування і наведення шлаку, регулярного відбору проб металу для хімічного аналізу, проведення вимірів температури металу, прибирання робочого майданчика, шлаковки, підготовки ковша і складу і т. п.

Висновок

На підставі проведеної роботи встановлені оптимальні межі концентрації вуглецю в металі після розплавлення: мінімальний запас вуглецю на кипіння рівний 0,35%, максимальний запас вуглецю не повинен перевищувати 0,6-0,7%. Відповідні вимоги діючих інструкцій мають бути переглянуті. Для цього доцільно дозволити цеху впродовж певного проміжку часу (очевидно, не менше року) працювати в дослідному режимі за новою технологією, при якій величина перевищення вмісту вуглецю над заданим визначатиметься межами 0,35-0,65. Упродовж усього цього періоду має бути забезпечений ретельний контроль за технологією плавки і якістю металу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційних шкідливих і небезпечних чинників у сталеплавильній лабораторії мартенівського цеху

Сталеплавильна лабораторія розташована в межах мартенівського цеху, тому інженер-дослідник піддається впливу низки небезпечних і шкідливих факторів, характерних для цього виробничого середовища. Мартенівське виробництво належить до категорії підвищеної небезпеки. У процесі виплавки та розливання сталі робітники контактують із розплавленим металом і шлаком, що супроводжується роботою у високотемпературних умовах. Вивчення металургійних процесів поблизу джерел тепла може спричиняти перегрів організму.

Під час підготовки матеріалів і печей до плавки, заливання чавуну, а також випуску та розливання сталі в робочу зону виділяється значна кількість пилу, променевої енергії, оксидів азоту та сірки, а також інші шкідливі речовини. Складність цехового простору доповнюється насиченістю електромостовими кранами, завалочними машинами та іншим механічним і електричним обладнанням, що підвищує ризик механічних травм або ураження електричним струмом. Особливу небезпеку становлять рухомі та обертові механізми.

Результати плавки — сталь і шлак, які виводяться з печі, є вибухо- та пожежонебезпечними, сприяють загазованості приміщення й додатковому тепловиділенню.

Згідно з класифікацією, до основних небезпечних і шкідливих факторів належать:

- рухомі машини та механізми;
- рухомі частини виробничого обладнання;
- загазованість робочої зони під час продувки металу аргоном у ковші;
- запиленість робочої зони при перевантаженні сипучих матеріалів.

Додатково виникають небезпеки у вигляді виплесків і викидів розплавленого металу зі сталерозливного ковша при його переміщенні чи з проміжного ковша, а також прорив рідкого металу з ємності. Наслідком таких явищ можуть бути опіки різного ступеня важкості аж до повного згоряння працівника.

Пил, що присутній у робочій зоні, впливає на організм залежно від свого складу й походження. Нетоксичний пил може подразнювати шкіру, очі та вуха. Дисперсність пилу впливає на його взаємодію з організмом: чим вища дисперсність, тим легше його частинки проникають до дихальних шляхів. При вдиханні в легені потрапляють частинки розміром 0,01–10 мікрометрів: частинки до 0,01 мікрометра видихаються назад із повітрям, тоді як частинки 5–10 мікрометрів осідають у носоглотці.

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

№ п/п	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення (ПДК)	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови і характер праці			Тривалість дії фактора за зміну, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хім. речовини, мг/м^3 1 клас небезпеки - озон II клас 3-4 клас небезпеки – оксиди азоту	 0,1 5	 0,7 7	 2,5	 	 0,7	 80 80
2	Пил фиброгенної дії, мг/м^3	4	5				
3	Вібрація, дБ	107	110	2.3			95
4	Шум, дБ	55	65		4		80
5	Неіонізуюче випромінювання: - радіочастотний діапазон, В/м - діапазон пром. частоти, кВ/м -оптич. діапазон (лаз.), Вт/м^2	20	37	20	-		85
6	Мікроклімат у приміщенні (у теплий період) : - Температура повітря, °С - Швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, %	 23-25 0,1 40-60	 27 0,4 65	 - 1 0,3	 - - -	 - - 	 85 95 85
7	Мікроклімат у приміщенні (у холодний період) : - Температура повітря, °С - Швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, %	 22-24 0,1 40-60	 24 0,12 58	 - - -	 - - -	 - - 	 92 93 92
8	Атмосферний тиск, мм. рт. ст.	760	755				85
	Напруженість праці	помірковано – напружена Категорія важкості – легка Іа					

Як демонструє таблиця, згідно з гігієнічною класифікацією праці, основними чинниками, що найбільш суттєво впливають на умови роботи інженера-дослідника в мартенівському цеху, є температура та вібрації.

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

Для запобігання травмуванню працівників повинні бути дотримані такі вимоги: відстань від підлоги робочої площадки до нижньої частини рами завалочної машини має бути не менше 600 мм, а від засіків із заправними матеріалами – не менше 400 мм. Ходові колеса завалочної машини необхідно захищати кожухом із зазором між рейками і кожухом, який не перевищує 10 мм. Такі машини мають бути обладнані звуковою сигналізацією та гальмами миттєвої дії.

Щоб уникнути вибухів, забороняється завантаження вологих матеріалів у розплавлену ванну. Для просушування руди та бокситу слід обладнати сушильні установки. З міркувань безпеки, при подачі состава із чавуном, ковші мають бути спрямовані вперед, а укладач чи зчіплювач повинні перебувати попереду состава. Швидкість його руху не повинна перевищувати 4 км/год. Для запобігання розбризкуванню чавуну під час зливу з ковша, заливний ківш необхідно розташовувати на 100–150 мм нижче верхнього краю ковша, а сам ківш повинен підтримуватися у чистому стані та своєчасно ремонтуватися.

Для забезпечення безпечних умов праці ширина площадки перед піччю має бути не менше 2,5 м. Захист робітників від теплового випромінювання здійснюється за допомогою водоохолоджуваних теплоекранів та знімних огорож. Пульти управління слід розташовувати між колон печного прольоту напроти печей із забезпеченням провітрювання приміщення. Вікна пультів для захисту від теплового випромінювання засклюються товстим склом завтовшки 10–15 мм.

Під час виконання робіт обов’язково потрібно використовувати відповідний спецодяг. Перед початком роботи необхідно надягати спецодяг акуратно, застібаючи його на всі ґудзики. Сталевар та його помічник повинні бути одягнені в суконний костюм, вачаги, спеціальне взуття, каску; брюки мають заходи-

ти поверх взуття, а куртка – поверх штанів; волосся слід прибрати під головний убір. Майстри мають носити суконний одяг, рукавички, міцне взуття та каску.

Залежно від характеру і місця виконуваних робіт використовуються засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): окуляри (сині – для захисту від інфрачервоного випромінювання, білі – від пилу), беруші (від високого рівня шуму), безклапанний респіратор «Пелюстка» або протигази (від пилу та шкідливих речовин), каски й вачаги (для захисту від контакту з гарячими поверхнями).

Для захисту від виробничого шуму в умовах сталеплавильного цеху використовуються протишумові вкладиші з матеріалу ФПП-Ш, відомі як "Беруші", які призначені для одноразового використання протягом одного робочого дня. Додатково застосовуються шумозахисні навушники.

Комплекс заходів щодо захисту від шуму та вібрації в цеху включає забезпечення герметичності повітроводів, газопроводів, арматури, кожухів печі та повітронагрівачів. Важливе значення в мінімізації впливу шуму і вібрації мають автоматизація та механізація виробничих процесів.

Захист від електричного струму забезпечується за допомогою застосування гумових рукавиць, килимків та обов’язкового заземлення всієї металевої поверхні цеху.

Для захисту від інфрачервоного випромінювання в цеху, зокрема на робочому місці сталевара, передбачені теплозахисні водоохолоджувальні екрани. Ці екрани дозволяють локалізувати джерела променистої теплової енергії, знизити рівень опромінення на робочих місцях, а також сприяють зменшенню температури поверхонь, що оточують робочу зону.

4.3 Заходи з електробезпеки

При впливі електричного струму можуть виникати електротравми, такі як електричний удар або опік. Електричний удар виникає при контакті зі струмопровідними частинами обладнання. Опік, своєю чергою, зумовлений електричною дугою, яка супроводжує комутаційні процеси в електричних колах.

Внутрішньоцехову електричну мережу прокладають за допомогою ізольованих проводів або кабелів із захисною оболонкою. Ця оболонка повинна

відповідати умовам експлуатації за механічною міцністю та стійкістю до впливів навколишнього середовища. У мережах загального освітлення напруга не повинна перевищувати 250 В. Для приміщень з підвищеною небезпекою, а також для місцевого і ремонтного освітлення чи ручного інструмента, допустима напруга становить не більше 36 В.

Норми передбачають регулювання відстані від проводів до землі, транспортних шляхів, будівель та інших об'єктів. Встановлюються мінімальні припустимі поперечні перетини проводів для забезпечення їх механічної міцності та уникнення обривів. Для захисту від випадкового контакту струмопровідні частини розташовують у недоступних місцях: на висоті, під підлогою або приховано в стінах. Мінімальна висота підвіски голих проводів становить 3,5 м, за умови, що не потрібно додаткової висоти для уникнення можливого контакту з предметами чи транспортними засобами. Найменша допустима відстань до працюючих становить 0,7 м при напрузі 15 кВ і 3 м при напрузі 220 кВ.

Голі струмопровідні частини, до яких можливий контакт людей, обов'язково огороджують у всіх випадках, якщо напруга перевищує 65 В у звичайних приміщеннях або 36 В у приміщеннях із підвищеною небезпекою. У разі напруги більше ніж 250 В необхідно захищати не лише голі, але й ізольовані струмопровідні частини. Електроустаткування повинно бути пофарбоване у встановлені кольори не лише з естетичною чи розпізнавальною метою, але й для певного рівня захисту. Завдяки ізолюючим властивостям фарбувального покриття при аварійних ситуаціях знижуються ризики формування електричного кола через тіло працівника.

Як захисну ізоляцію можна застосовувати покривні електроізолюючі лаки, плівки, емалеві або олійні фарби.

4.4 Пожежна безпека

Пічний проліт мартенівського цеху класифікується як пожежонебезпечна зона категорії Г. Це зумовлено тим, що виробничий процес пов'язаний із обробкою

гарячих або розплавлених матеріалів, які утворюють випромінюване тепло та полум’я; як паливо використовується газоподібне пальне.

Будівля виконана з вогнестійких матеріалів, таких як сталь і залізобетон. За вогнестійкістю конструкцій цех відповідає І ступеню.

У приміщенні можливі випадки, коли розплавлений метал чи шлак потрапляють на вологу підлогу, ґрунт, матеріали або елементи конструкцій. Такі явища зазвичай супроводжуються вибухами та розбризкуванням рідкого металу або шлаку.

Вибухи в зоні роботи фурм є особливо небезпечними, оскільки в такі моменти відбувається руйнування зводу, а через відкритий простір фурми на робочу площадку можуть вивергатися розпечений кокс і гази. В атмосфері ці гази запалюються, утворюючи довге полум’я.

Профілактичні протипожежні заходи:

1. Для обмеження поширення вогню застосовуються негорючі матеріали (азбест, спеціальна вата).

2. У місцях вводу газопроводів у підвальні приміщення встановлюють дренажні пристрої, які запобігають проникненню газу до цих приміщень.

Пожежне депо розташоване на відстані чотирьох кілометрів від цеху. Зовнішнє пожежогасіння об'єктів цеху забезпечується за рахунок кільцевої водопровідної мережі з установленими пожежними гідрантами. Розрахункова витрата води для гасіння однієї пожежі становить 40 л/с.

Автоматичні системи аерозольного та порошкового пожежогасіння модульного типу (АУП) призначені для:

- виявлення осередку займання;

- подачі сигналу про пожежу до пульта чергового персоналу;

- розподілу гасильних речовин у приміщеннях;

- локалізації та ліквідації загорянь на початковому етапі.

Евакуація людей у разі пожежі: Передбачені евакуаційні маршрути дозволяють забезпечити безпеку людей за умов максимальної швидкості руху 16 м/хв. Довжина шляхів евакуації не повинна перевищувати 50 метрів для одно- та двоповерхових будівель І та ІІ ступеня вогнестійкості категорії А. Сумарна ширина ма-

ршрутів та виходів визначається на основі показника 0,6 метра на кожні 100 осіб, що евакуюються. Кількість евакуаційних виходів повинна бути щонайменше дві, розташованих, по можливості, на протилежних сторонах приміщення.

Для своєчасного виявлення пожеж у приміщеннях встановлюють теплові й димові пожежні датчики марок З-2000-СМК. Біля зовнішніх виходів розміщуються ручні пожежні сповіщувачі марки БолидИПР-513-3А.

Система пожежної сигналізації дозволяє реєструвати ознаки займання, а також видавати звукові та світлові сигнали про спрацювання відповідного обладнання.

4.5 Технічні рішення у сфері виробничої санітарії

4.5.1 Опалення та вентиляція цеху

У пічному проліт мартенівського цеху через виділення значної кількості надлишкового тепла необхідний високий рівень повітрообміну, особливо в спекотний літній період. Вентиляційна система працює за принципом заміщення: видалення забрудненого повітря з приміщення та подачі свіжого всередину. У приміщенні мартенівського цеху природний повітрообмін здійснюється за рахунок двох основних чинників – різниці температур, яка створює тепловий тиск, та вітрового впливу, що забезпечує вітровий тиск.

Для притоку зовнішнього повітря в мартенівському цеху на зовнішніх стінах обладнані спеціальні отвори, розташовані на висоті 2 м від підлоги. Щоб посилити тепловий тиск, на конструкції будівлі встановлені витяжні шахти, оснащені дефлекторами, які використовують силу вітрового напору для збільшення повітрообміну. Така організація вентиляційних отворів дозволяє забезпечити ефективну вентиляцію в літній сезон шляхом відкриття обох рядів отворів, а взимку регулювати повітрообмін, закриваючи нижні прорізи, і тим самим сприяти підігріву повітря перед його надходженням до робочих зон.

У відділенні позапічної обробки характерною особливістю є значний рівень інфрачервоного випромінювання, який становить 1000 Вт/м², перевищуючи допустимі норми.

Таблиця 4.2 – Значення встановлених допустимих (оптимальних) параметрів повітряного середовища у робочій зоні виробничих приміщень

Характеристика вироб.приміщень по надлишковим тепловиділенням	Категорія роботи	Період року (теплий, холодний) На постійних робочих місцях			Температура повітря поза постійними робочими місцями, ^{0}C
		$T_{повітря}$, ^{0}C	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с	
Більш 23 Вт/м^3	Важка -3	16-27(18-20) 12-19(16-18)	74(40-60) 74(40-60)	0,2-0,7(0,4) не більш 0(0,1)	15-25(20) 0-10(10)

Захисні засоби від впливу випромінювання включають використання спеціального одягу, до складу якого входить костюм із сукна, темно-сині захисні окуляри, черевики, рукавиці та каска. Також передбачено дотримання відповідних інструкцій: зокрема, під час переливання рідкого металу перебування працівників у небезпечній зоні з радіусом 5-6 метрів суворо забороняється.

4.5.2 Освітлення виробничих приміщень

У пічному прольоті мартенівського цеху передбачено як природне, так і штучне освітлення. Для забезпечення природного освітлення в будівлі цеху передбачено світлові прорізи в стінах, площа яких становить 20% від площі підлоги. Нормативне значення коефіцієнта природної освітленості дорівнює 1%.

У разі недостатності природного освітлення використовуються штучні джерела світла з мінімальною нормою освітленості 300 лк відповідно до встановлених норм. Як штучне освітлення застосовуються лампи розжарювання типу НБ потужністю 60 і 100 Вт, а також НГ потужністю 500 Вт. Світлова віддача цих ламп зростає зі збільшенням їхньої потужності, хоча не перевищує 18 лм/Вт. Термін служби більшості ламп становить близько 1000 годин.

Особливістю освітлення в цеху є наявність у полі зору працівників безпосередньо освітлюваних об'єктів, таких як полум'я, розплавлений та нагрітий метал і шлак. Яскравість нагрітого металу коливається в межах 71 500–112 000 нт.

Умови роботи потребують постійного спостереження за світними поверхнями для контролю ходу процесу, оцінки температури, якості металу та шлаку тощо.

З огляду на це, необхідно сформувати певну яскравість поля адаптації, тобто забезпечити встановлений рівень освітленості навколишніх предметів. Освітленість території цеху прийнята на рівні до 5 лк. Електропостачання освітлювальних установок заплановано від джерел напруги 380/220В, передбачених у проекті цеху. Коефіцієнт запасу світильників, з урахуванням запиленості приміщення, дорівнює 1,7.

Згідно з нормами роботи в гарячих цехах з матеріалами, що світяться, мінімальний розмір об'єкта для розпізнавання становить понад 0,5 мм. Клас зорової роботи за таких умов визначено як VII. Коефіцієнт природної освітленості при комбінованому освітленні дорівнює 2,7%, а при звичайному освітленні— 0,9%.

4.5.3 Санітарно-побутові приміщення

Для забезпечення ефективної роботи персоналу мартенівського цеху в умовах інтенсивних тепловиділень важливо дотримуватись раціонального режиму праці та відпочинку. Це включає регламентовані перерви, облаштування кімнат відпочинку з подачею кондиціонованого повітря, а також наявність водяних процедур, таких як напівдуші, обмивання та обтирання.

Тривалість безперервного виконання робіт у зоні з надлишковим теплом не повинна перевищувати 10 хвилин. Після двох годин роботи передбачено 15-хвилинну перерву, яка має проходити в спеціально обладнаній кімнаті відпочинку.

Для адаптації нових працівників, молодших спеціалістів, а також тих, хто повертається до роботи після хвороби чи відпустки, у перші 2-3 тижні слід надавати перевагу виконанню легких або середньої важкості завдань із поступовим збільшенням навантаження. Крім цього, обов'язковими є перерви тривалістю 8-10 хвилин.

Кімнати відпочинку повинні бути розташовані в герметично ізольованих від зовнішнього шуму приміщеннях зі звуковим рівнем не вище 50 дБ. Їх слід оснащувати системами кондиціонування повітря, автоматичними установками ОМ-1 для оксигенопрофілактики, напівдушами і зручними кріслами, що забезпечують комфортну позу для релаксації м'язів.

Окрім заходів технологічного, планувального та технічного характеру, які спрямовані на зменшення впливу виробничих факторів, велике значення надається підвищенню стійкості організму працівників. Такі дії реалізуються через медико-санітарне обслуговування і включають:

а) медичні огляди (попередні під час прийому на роботу та періодичні протягом трудової діяльності) для працівників у шкідливих умовах;

б) використання лікувально-профілактичного харчування;

в) застосування адаптогенів і засобів природного походження для профілактики негативного впливу виробничого середовища.

Для підтримання вітамінного балансу в організмі працівників мартенівського цеху рекомендовано споживання вітамінізованих напоїв на основі чаю або молочнокислих продуктів. Пункти видачі питної води мають розміщуватись у безпосередній близькості до робочих місць. Харчування персоналу має бути різноманітним та багатим на вітаміни.

З метою підвищення стійкості організму до різких температурних змін, застудних та інших захворювань доцільно відвідувати оздоровчий комплекс. Там можуть бути проведені водяні процедури (сауна, басейн, душ, обтирання), сеанси інгаляцій, фізіотерапевтичні процедури тощо.

4.5.4 Виробничий шум

Рівень шуму в пічному прольоті мартенівського цеху не перевищує 80 дБ, що відповідає допустимим нормам шуму. У зв'язку з цим спеціальні будівельні рішення, конструкції чи обладнання не передбачаються. Водночас, шум може спричиняти різноманітні загальнобіологічні зміни, функціональні розлади та механічні ушкодження. Це, у свою чергу, може призводити до професійних захворювань, зокрема приглухуватості, розриву барабанної перетинки (при шумі

120-140 дБ), порушень роботи серцево-судинної системи чи функціонування шлунка.

До основних джерел шуму в цеху належать мартенівська піч, технологічне обладнання (мостові крани, насоси, автонавантажувачі тощо), а також сопла фурми, через які виходить кисень зі швидкістю звуку.

Для зменшення шуму в цеху передбачено такі заходи:

- ізоляція установок у спеціальних укриттях, що забезпечує зниження шуму поблизу технологічного обладнання;

- розміщення вентиляційного обладнання в окремих приміщеннях або поза межами мартенівського цеху;

- встановлення вентиляторів на віброізолюючих основах із приєднанням до повітропроводів через гнучкі вставки;

- використання звукоадсорбційних матеріалів на стінах;

- застосування індивідуальних засобів захисту, таких як спеціальні шоломи та антифони (протишумові підшоломники та заглушки чашкового типу).

4.5.5 Засоби індивідуального захисту

Сталевар повинен використовувати спеціальний захисний одяг, виготовлений із незаймистих матеріалів, стійких до дії променевої енергії, легких і добре провітрюваних (наприклад, сукно, брезент, хімічно оброблене волокно з металізованим покриттям тканин).

Для захисту очей слід застосовувати світлофільтри у формі окулярів або щитків. Для захисту органів дихання від пилу використовуються респіратори (наприклад, пелюсткові). Захист органів слуху від шуму забезпечують беруші. Окуляри зі світлофільтрами необхідні для запобігання впливу на очі енергії випромінювання. При роботі біля печей використовуються скла СС4 та СС11, які кріпляться до козирка або головного убору (каски). Окуляри виготовляються зі спеціального жовто-зеленого чи синього скла. Також передбачено використання спеціального шкіряного взуття.

У захисних черевиках передня частина закрита, оснащена додатковою прокладкою з еластичного поропласта або кількох шарів бавовняної тканини. Підошва такого взуття виготовляється із хромового дублення.

Місце для відпочинку робітників відокремлюється від виробничої зони за допомогою склоблоків. Його площа становить 2-3 м², висота — 2,3 м. Для усунення теплової подушки в повітрі передбачено природну вентиляцію крізь перекриття.

4.6 Розрахунок межі вогнестійкості суцільних конструкцій під одностороннім обігрівом (з урахуванням прогріву)

Розрахунок проводиться для визначення часу, протягом якого бетонна стіна може зберігати свою несучу здатність під впливом пожежі. Такий аналіз важливий для оцінки стійкості будівлі в умовах надзвичайної ситуації. У процесі розрахунку використовуються параметри «стандартної» пожежі, де зміна температури з часом описується логарифмічним законом.

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

де $t_п$ - температура пожежі, °С;

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

τ - час, сек.

Для бетонних і неметалевих стін або плит межу вогнестійкості визначають за критерієм прогріву. Визначають, скільки часу потрібно, щоб температура обігрітої поверхні піднялася на 160 К. Отриманий час і є межею вогнестійкості конструкції.

Межа вогнестійкості, хвилини:

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

де Bi - критерій Біо;

d - товщина стіни, м;

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

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

Критерій Біо:

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

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

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

Коефіцієнт тепловіддачі добудемо за емпіричною формулою:

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

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

Коефіцієнт температуропровідності:

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

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

ρ - щільність матеріалу, кг/м^3.

Температуропровідність бетону залежить від початкового вагового вмісту вологи W, %:

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

тут *c* і ρ беремо для сухого бетону. Значення W береться рівним 2 %. Теплоємність сухого бетону при температурі t = 250 °C задається значенням 6 Дж/кг·К, а щільність сухого бетону становить 2066 кг/м³.

Коефіцієнт теплопровідності визначається за наступною формулою.

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

Коефіцієнт температуропровідності:

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

Критерій Біо:

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

За довідником: μ_1=2,739, A_1=-0,255.

Межа вогнестійкості:

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

Висновок: Проведений розрахунок дозволив визначити ступінь вогнестійкості будівлі цеху, що характеризує її здатність протистояти руйнуванню під час пожежі. У результаті встановлено, що за умов пожежі будівля з бетонними стінами товщиною 0,6 метра залишатиметься неспалимою протягом 101 хвилини (або 1,68 години).

Висновки

1. На основі аналізу залежності швидкості зневуглецювання від концентрації вуглецю можна припустити, що під час кипіння металу в мартенівській печі за стандартних умов функціонування відбувається зміна лімітуючого фактора. Якщо вміст вуглецю в металі перевищує критичну межу, процес зневуглецювання обмежується масопереносом кисню. При нижчому за критичний вмісті вуглецю обмеження виникає як через масоперенос кисню, так і через перенесення вуглецю до реакційної зони.
2. Аналіз змін кінематичної в'язкості залізовуглецевого розплаву дозволив висловити припущення, що "самоприскорення" процесу зневуглецювання пов'язане зі зміною структури ближнього порядку в рідкій сталі. Це спостерігається при концентрації вуглецю у металі меншій за 0,5-0,4%, разом із відповідними умовами утворення і виділення нової фази — бульбашок CO. Процес зміни швидкості окислення вуглецю в киплячій ванні при концентраціях вуглецю < 0,5% слід оцінювати, враховуючи одночасні зміни умов зародження нової фази та виникнення нового лімітуючого фактора — дифузії вуглецю.
3. Результати статистичного аналізу значної кількості плавок дають змогу зробити такі висновки:

   - для інтенсивного та рівномірного розвитку процесу зневуглецювання до дуже низьких концентрацій вуглецю оптимальний перегрів металу над температурою ліквідус має становити 45–95°C. При перегріві менше 45°C зневуглецювання відбувається нерівномірно. У разі значного перегріву (понад 90–100°C) критичні концентрації вуглецю, за яких змінюється кінетика процесу, збільшуються з 0,20–0,29 до 0,30–0,40% C, що спричиняє передчасне припинення кипіння металу.

   - при перегріві металу понад 90–100°C у діапазоні критичних концентрацій вуглецю відбувається значне зниження швидкості нагріву металу.

   - щоб забезпечити швидке нагрівання металу під час стадії чистого кипіння, швидкість окислення вуглецю повинна складати: для концентрацій вуглецю

нижче критичних — не менш ніж 0,0020% С/хв; для концентрацій вище критичних — у межах 0,0045–0,0095% С/хв.

4. Незадовільний рівень вмісту вуглецю в металі після розплавлення залишається основною причиною перепризначення плавок. При цьому кількість плавок, перепризначених через підвищену концентрацію вуглецю, майже дорівнює кількості плавок, змінених через "м'яке розплавлення".
5. Тривалість періоду кипіння здебільшого (на 70-90%) залежить від запасу вуглецю в металі після розплавлення і швидкості окислення вуглецю. Водночас вплив запасу вуглецю на тривалість періоду кипіння приблизно вдвічі перевищує вплив швидкості його окислення.
6. Тривалість періоду чистого кипіння меншою мірою залежить від запасу вуглецю в металі після розплавлення, ніж загальна тривалість всього періоду кипіння.
7. У конкретних виробничих умовах процес десульфурації відбувається досить інтенсивно і практично не впливає на тривалість періоду кипіння.
8. Зі збільшенням запасу вуглецю на стадії кипіння значно зростає витрата залізняку для поліровки. Попри це, вміст фосфору в сталі не залежить від обсягів спожитого залізняку. Подовжена поліровка мартенівської ванни значними порціями залізняку лише збільшує тривалість плавки, не покращуючи при цьому якість сталі.
9. Ступінь окисленості киплячого металу визначається переважно рівнем вмісту вуглецю на конкретному етапі плавки і не має прямої залежності від його кількості після розплавлення.
10. Мінімальний рівень запасу вуглецю в металі після розплавлення у встановлених умовах цеху становить 0,30-0,35%.
11. Зменшення запасу вуглецю до 0,30-0,35% дозволяє одержувати сталь із низьким рівнем сірки, фосфору і неметалічних включень, а також із високими механічними властивостями як уздовж, так і впоперек волокна.
12. Зниження рівня запасу вуглецю у металі до 0,30-0,35% сприяє суттєвому зменшенню витрат залізняку, вапна та чавуну під час плавки. Це також підвищує продуктивність мартенівських печей і знижує собівартість отриманої сталі.

Перелік джерел посилання

1. Левин С.Л. Сталеплавильные процессы. Київ : Техніка, 1963. 404 с.
2. Меджибожський М.Я., Харлашин П.С. Основи термодінамики і кінетики сталеплавильних процесів: Підручник для студ. вузів. Київ : Вища школа, 1993. 327 с.
3. Сталеплавильне виробництво: навч. посіб. / В.І. Баптизманський та ін.]. Київ : ФЗМН, 1996. 400 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Смірнов О. М., Макуров С. Л., Сафонов В. М. Виробництво зливків сталі та промислових сплавів : навч. посіб. Донецьк : Ноулідж, 2013. 405 с.
8. Попович В. В., Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Львів : Світ, 2006. 624 с.
9. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. / А. М. Верховлюк, А. В. Нарівський, В. Г. Могилатенко. За ред. академіка НАН України В. Л. Найдека. Київ : Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224 с.
10. Збожна О. М. Основи технологій : навч. посіб. Тернопіль : Картбланш, 2002. С. 30–58.
11. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Київ : Наука, 2005. С. 45−48.

12. Попович В., Голубець В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Книга ІІ. Суми : Університетська книга, 2002. С.259.
13. Державні санітарні правила "Підприємства чорної металургії" ДСП 3.3.1.038-99.
14. Наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».
15. Наказ МОЗ України «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони» 14.07.2020 № 1596.
16. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.
17. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вібраційна безпека. Загальні вимоги.
18. ДСТУ 3038-95 Гігієна. Терміни та визначення основних понять.
19. ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты. Общие технические требования (ГОСТ 12.4.221-2002, IDT).
20. НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безопасной эксплуатации электроустановок (ДНАОП 1.1.10-1.01-97).
21. 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)).
22. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.
23. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.

ДОДАТОК А

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

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

ІНЖЕНЕРНІ ІННОВАЦІЇ ТА РОЗБУДОВА НАЦІОНАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ

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

15–16 травня 2025 року

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

УДК 669.141.2

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

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

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ОКИСЛЕННЯ ВУГЛЕЦЮ В УМОВАХ МАРТЕНІВСЬКОЇ ПЛАВКИ

Актуальність. Окислення вуглецю справедливо вважається головною реакцією сталеплавильних процесів.

Вуглець виступає основним споживачем кисню, який надходить у ванну для окислення домішок. У мартенівському процесі на окислення вуглецю витрачається 80 % і більше від загальної кількості кисню. Кипіння сталі, викликане виділенням газоподібних продуктів реакції та їх підняттям крізь шлак і метал, сприяє перемішуванню ванни та пришвидшує всі тепло- і масообмінні процеси.

При окисленні вуглецю формуються CO і CO_2, обсяг яких в тисячі разів перевищує обсяг металу. В окислювальному процесі мартенівського переділу реакція настільки важлива, що управління плавкою переважно зосереджується на процесах, пов'язаних зі зменшенням вмісту вуглецю у ванні.

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

Мета. Дослідити фізико-хімічні особливості процесу окислення вуглецю в умовах мартенівської плавки з метою вдосконалення технології и можливості регулювання процесу.

Основний текст. Вуглець є однією з найважливіших домішок у металі, відіграючи важливу роль у сталеплавильних процесах. Він розширює температурний діапазон стійкого стану γ-Fe та покращує властивості заліза, що дозволяє виробляти сталь із різноманітними механічними характеристиками.

Окислення вуглецю вважається основною реакцією сталеплавильних процесів, оскільки вуглець є основним споживачем кисню, поданого для

окислення домішок. У мартенівському процесі на окислення вуглецю йде до 80 % від загальної витрати кисню. Кипіння сталі, викликане виділенням газоподібних продуктів реакції, які проходять через шлак і метал, сприяє перемішуванню ванни та прискорює тепло- і масообмін.

Під час окислення вуглецю утворюються CO та CO2, обсяг яких значно перевищує обсяг металу. Бульбашки CO, проходячи через рідкий метал, допомагають видаляти гази та неметалеві включення. Нагрівання ванни теплом, що виділяється під час окислення вуглецю, має велике значення в кисневих процесах. Наприклад, у киснево-конвертерному процесі тепло від окислення вуглецю становить 20–25 % від загального теплового балансу плавки. У сучасних високопродуктивних сталеплавильних процесах металева шихта включає 70–80 % чавуну (3,0–3,5 % C).

Тривалість плавки та продуктивність агрегату насамперед залежить від швидкості видалення вуглецю з металу. Режим видалення вуглецю визначає якість сталеплавильних процесів, включаючи вихід придатного металу, його окисленість, наявність неметалевих включень та швидкість шлакоутворення, що впливає на ступінь усунення домішок. Важливість окислення вуглецю під час мартенівського переділу настільки велика, що управління плавкою істотно пов'язане з процесами зневуглецювання ванни.

Окиснення вуглецю, розчиненого в металевих розплавах на основі заліза, відіграє ключову роль у сучасній технології виробництва сталі. Незалежно від технологічних процесів–від плавки в кисневих конвертерах із використанням скрапу до «переплаву» в дугових електропечах–виникає необхідність визначення співвідношення середніх концентрацій вуглецю в шихті з тривалістю періоду, потрібного для розплавлення скрапу, утворення однорідного шлаку та нагрівання металевої ванни до температури, відповідної її подальшому розкисленню, легуванню та якісному розливанню. Протягом цього часу у метал із газової фази постійно надходить кисень.

Для запобігання його накопиченню, підтримання концентрації кисню на відносно низькому рівні та мінімізації втрат металу внаслідок переходу в шлак, у розплавленому металі має бути присутнім елемент із високою хімічною спорідненістю до кисню, який водночас є економічно доступним. Зазвичай ці функції виконує вуглець. При концентрації вуглецю [C] ≥ 0,2 % цей елемент ефективно контролює залишкову концентрацію кисню у металі, що робить його незамінним компонентом у виробничих процесах. Однак важливість вуглецю цим не обмежується. Окрім своєї ролі в хімічних реакціях, вуглець є унікальним елементом металевої ванни, який під час плавки утворює газоподібні продукти окиснення – чадний газ {CO}, а при низьких концентраціях [C] – суміш чадного газу {CO} та вуглекислого газу {CO_2}. Виділення цих газів має значний технологічний вплив. Газові продукти окиснення визначають інтенсивність

перемішування рідкого металу. Це, своєю чергою, прискорює процеси вирівнювання хімічного складу металу, сприяє ефективному хімічному взаємодіянню між компонентами та підвищує швидкість теплопереносу.

Таким чином забезпечується рівномірний прогрів та стабілізація температури в об'ємі металу. Водночас зародження й спливання бульбашок чадного газу {CO} у металі сприяє частковому переходу розчинених у рідкому розплаві водню та азоту до газової фази відповідно до закону Генрі. Окрім цього, спливання бульбашок {CO} полегшує процес флотування дрібнодисперсних неметалевих включень із металу та їх наступне поглинання шлаком.

Висновки. Процес окислення вуглецю і зневуглецювання мартенівської ванни є досить складним і багатостадійним, механізм якого ще досі є не до кінця встановленим.

Список використаних джерел

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

УДК 669.046.582.2

Харченко Олександр Вікторович
к. т. н., старший науковий співробітник, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

Благодарний Вячеслав Олегович
магістрант 2 курсу, спеціальність 136 «Металургія»
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

ЗАСТОСУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ЗАСВОЄННЯ ДЛЯ ЛЕГУВАННЯ ТА РОЗКИСЛЕННЯ СТАЛІ

У сучасному сталеплавильному виробництві широкого поширення набуло проведення розкислення і легування сталі при випуску металу з печі в ківш, з подальшою десульфурацією на установці доведення металу