

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО
ВИРОБНИЦТВА

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної атестаційної роботи бакалавра
зі спеціальності 136 – **Металургія**

Тема роботи: Аналіз енергозберігаючих методів продувки металу в процесі конвертерної виплавки сталі

Виконав:
студент групи МТ-21-1

Фірман Анна Сергіївна

Керівник випускної роботи

Нормоконтролер

Завідувач кафедри

Кривий Ріг
2025 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра: металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою _____

« _____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на випускню атестаційну роботу бакалавра

1. Тема роботи: _____

керівник роботи: _____

затверджено наказом по КНУ від « _____ » _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання роботи студентом « _____ » _____ 20__ р.

3. Вихідні дані до роботи _____

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

5. Перелік графічного матеріалу

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз енергозберігаючих методів продувки металу в процесі конвертерної виплавки сталі»: 45 стор., 12 рис., 11 табл., 13 джерел.

Об'єктом дослідження: сталеплавильний цех, який функціонує за киснево-конвертерною технологією.

Метою роботи: дослідження сталеплавильного цеху, розробка матеріального і теплового балансу плавки сталі марки 10, вибір і обґрунтування оптимальних технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності виробництва й зменшення енергоспоживання.

У даній бакалаврській роботі проведено комплексне дослідження сталеплавильного цеху на основі киснево-конвертерного способу плавки сталі. Описано основні етапи виробництва сталі, обґрунтовано вибір технологічного процесу та основного устаткування. Особливу увагу приділено розрахункам матеріального й теплового балансу плавки, визначенню витрат сировини, шихти та кисню.

У спеціальній частині роботи проаналізовано сучасні енергозберігаючі технології киснево-конвертерного виробництва сталі, включаючи комбіноване продування ванни газами, допалювання відхідних газів, конструктивне вдосконалення кисневих фурм.

За результатами розрахунків обґрунтовано доцільність використання енергоефективних технічних рішень, які сприяють зниженню витрат палива, зменшенню втрат металу та підвищенню продуктивності сталеплавильного агрегату.

СТАЛЬ, КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНИЙ ПРОЦЕС, ШЛАК, РОЗКИСЛЕННЯ, ДУТТЄВІ ПРИСТРОЇ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ПРОДУВАННЯ.

ВСТУП

Сталеплавильне виробництво є основою чорної металургії та важливою складовою економіки будь-якої промислово розвиненої держави. Сталь, як універсальний конструкційний матеріал, широко застосовується в усіх галузях промисловості — машинобудуванні, будівництві, суднобудуванні, енергетиці, транспорті та оборонному комплексі. Від ефективності її виробництва значною мірою залежить рівень технологічного розвитку країни.

В останні роки в умовах глобальної конкуренції, нестабільності енергетичних ресурсів, жорстких вимог до якості продукції та посилення екологічних стандартів перед металургійною галуззю стоять нові виклики. Високий рівень енергоспоживання, втрати металу у процесі плавки, неефективна утилізація теплової енергії та відхідних газів — усе це знижує конкурентоспроможність вітчизняних металургійних підприємств. Тому актуальним стає завдання комплексної модернізації сталеплавильного виробництва, зокрема впровадження ресурсозберігаючих технологій, вдосконалення технічних засобів і процесів управління якістю сталі.

Серед усіх відомих методів виробництва сталі киснево-конвертерний процес посідає провідне місце за обсягом виробленого металу. Його переваги — висока продуктивність, гнучкість у використанні шихтових матеріалів, порівняно невелика тривалість плавки та знижені витрати енергоносіїв. Разом із тим, актуальним є завдання зниження енерговитрат у цьому процесі, підвищення якості кінцевого продукту та зменшення викидів в атмосферу.

Особливу важливість мають питання вдосконалення дуттєвих пристроїв, використання комбінованого дуття (кисень + інертні або окисні гази), впровадження технологій допалювання відхідних газів та попереднього підігріву металевих брухту. Ці інженерні рішення дозволяють не лише підвищити енергоефективність сталеплавильного агрегату, але й значно зменшити втрати металу та знизити навантаження на систему газоочистки.

Таким чином, актуальність теми роботи полягає в необхідності розробки сучасного, технічно обґрунтованого проекту сталеплавильного цеху, що відповідає сучасним вимогам до якості продукції, енергоефективності, екологічної безпеки та економічної доцільності. Запропоновані в роботі технічні та технологічні рішення спрямовані на удосконалення киснево-конвертерного процесу, підвищення його ефективності та адаптацію до сучасних викликів металургійного виробництва.

1 ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ НА СЬОГОДНІШІЙ ДЕНЬ

Виробництво сталі сьогодні здійснюється здебільшого з відпрацьованих сталевих виробів і передільного чавуну. Суть процесу виробництва сталі, у складі якої міститься набагато менша кількість вуглецю і домішок, порівняно з чавуном, полягає в тому, щоб у процесі плавки перевести ці домішки в шлак і газу, піддати їх примусовому окисленню.

Нині існує кілька пріоритетних способів виробництва сталі. До них належать киснево-конвертерний і електросталеплавильний способи виробництва (або плавлення) сталі.

1.1 Виробництво сталі в електричних печах

Електропечі – це спеціалізоване електротермічне обладнання, яке перетворює електричну енергію на теплову. Такі агрегати використовуються не тільки для виготовлення вуглецевих та низьколегованих марок, але й для виплавлення спеціальних високолегованих сталей, кольорових сплавів тощо. Електричний метод отримання сталі - другий за популярністю (близько 1/3 світової виплавки).

Електричні печі для виплавки сталі підрозділяються на дугові, індукційні і печі опору.

Основний обсяг виробництва припадає на дугові сталеплавильні печі (ДСП), у яких матеріал розплавляється за допомогою теплоти, що надходить від електричної дуги та внаслідок теплообміну з електродами. Такі печі відрізняються низьким споживанням електроенергії та високою продуктивністю – цикл плавки триває 40-55 хвилин (36-40 плавок на добу). Основна сировина для виробництва сталі у ДСП виступає металевий брухт (в останні десятиліття – ще й залізо прямого відновлення DRI/ HBI). Однак сучасні агрегати також можуть ефективно працювати за наявності в шихті близько 30% рідкого чавуну.

Значно менша частка виплавки електросталі припадає на індукційні печі. Вони мають менші ємність, продуктивність і стійкість футеровки в порівнянні з ДСП. Однак, внаслідок відсутності електродів та електричних дуг, індукційні

печі дозволяють отримувати сплави з низьким вмістом вуглецю та газів. При цьому забезпечується точне регулювання температури, високий електричний ККД та мінімальне вигорання легуючих добавок. Наразі таке обладнання переважно використовується при виготовленні високоякісних легованих сталей та спеціальних сплавів, а також як обладнання ливарних цехів та профільних лабораторій, де обсягів виплавки недостатньо для того, щоб ефективно застосовувати виробництво сталі в дугових печах.

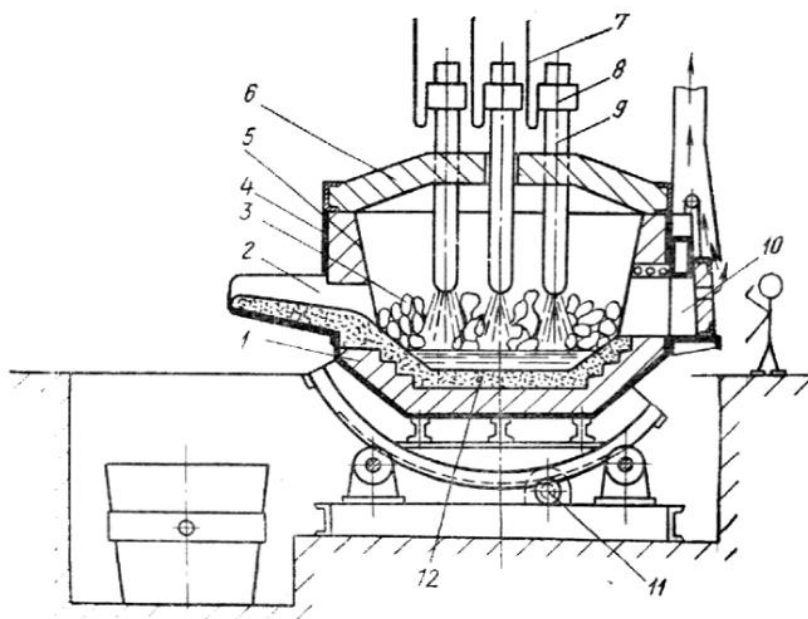


Рис.1 - Схема дугової плавильної електропечі

Переваги та недоліки плавки в електропечах.

Переваги:

- 1). Електропіч швидко нагрівається до заданої температури.
- 2) Температура печі легко регулюється.
- 3). Висока температура плавки (понад 20000С) дає змогу виплавляти сплави з високою концентрацією тугоплавких компонентів (хрому, молібдену, вольфраму та ін.).
- 4). Можливість регулювання температури завдяки зміні параметрів електричного струму, а також можливість створення в просторі печі необхідної

атмосфери: окислювальної, відновної, нейтральної або вакууму - все це дає змогу отримувати сталь високої якості будь-якого хімічного складу.

До недоліків можна віднести великі витрати електричної енергії, і пов'язану з цим високу вартість виплавленої таким чином сталі.

1.2 Виробництво сталі у кисневих конвертерах

Найпопулярнішим методом виплавки сталі - є киснево-конвертерний спосіб (наразі майже 2/3 світової виплавки). Сталь отримують з рідкого чавуну в конвертері з основним футеруванням і продуванням киснем (продування може бути зверху, знизу або комбінованим). Вихідні матеріали для виробництва сталі цим методом - рідкий передільний чавун, металобрухт, шлакоутворюючі (вапно, плавиковий шпат, залізна руда, боксити та ін.). Подачу кисню закінчують тоді, коли вміст вуглецю в розплаві відповідає заданому.

Загальна тривалість плавки в конвертерах становить 30-60 хвилин. Після цього конвертер нахилиють, випускаючи сталь у ківш через лютку. При цьому можуть одночасно вводитися розкислювачі та легуючі добавки, але в більшості випадків основне доведення сталі після виплавки в конвертерах здійснюють на агрегатах позапічної обробки, якими найчастіше виступають установки «ківш-піч» (УКП) та вакууматори.

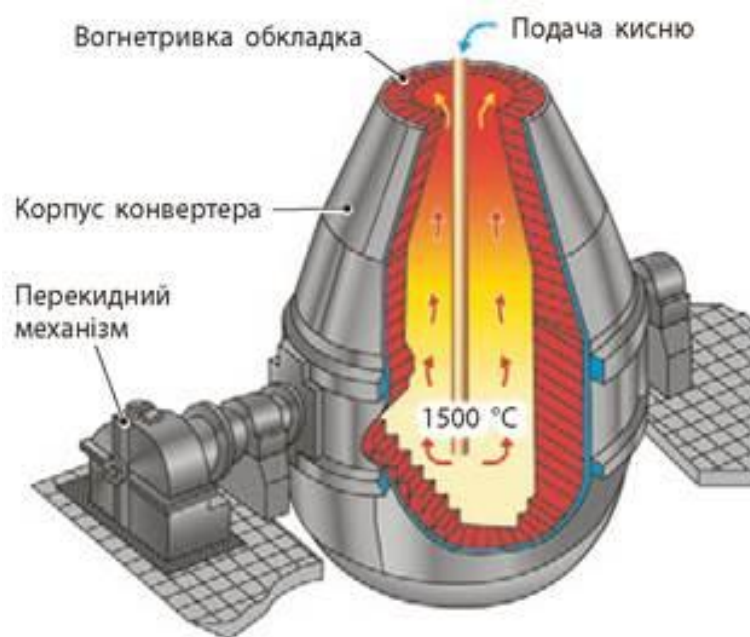


Рис. 2 - Будова кисневого конвертера

Переваги та недоліки отримання сталі в кисневому конвертері.

Переваги:

1) У кисневому конвертері можна зупиняти процес на заданому вмісті вуглецю й отримувати сталь найрізноманітніших марок (за винятком високолегованих).

2) Якість одержуваної сталі, що визначається кількістю найшкідливіших домішок - сірки і фосфору - аналогічна якості мартенівської сталі.

3) Коефіцієнт використання палива, що дорівнює 70%, при конвертерному способі значно більший порівняно з іншими способами, через що відпадає необхідність наявності міксерів (сховищ рідкого чавуну).

4) Основна перевага конвертерного способу виплавки сталі насамперед пов'язана з високою продуктивністю. Продуктивність кисневого конвертера становить 400 тонн сталі на годину, продуктивність мартенівської печі - 80 - 100 т/год.

До недоліків цього способу слід віднести:

1) великий угар металу (до 10%);

2) неможливість переробки тільки залізного брухту;

3) труднощі в отриманні сталі заданого хімічного складу;

4) неможливість отримання високолегованих сталей; (Киснево-конвертерним способом виплавляють тільки вуглецеві сталі і деякі марки низьколегованих сталей. Це пов'язано зі швидкоплинністю процесу плавки, за якої не можна ефективно провести аналіз проб сталі).

5) необхідність спорудження складних дорогих пилоочисних установок, оскільки процес плавки супроводжується викидом великої кількості шкідливого пилу.

Одна з найпопулярніших марок сталі, яку виготовляють за допомогою киснево-конвертерним способом є Сталь 10. Сталь 10 – якісна конструкційна

вуглецева сталь, яка використовується для виробництва пластичних деталей і конструкцій, що експлуатуються при температурах до 350°C. Гарячекатаний і кований сортовий прокат зі сталі 10 випускається відповідно до вимог стандарту ДСТУ 7809 і ГОСТ 1050, хімічний склад за даними стандартам поширюється і на інші види прокату.

Таблиця 1 - Хімічний склад сталі 10 відповідно до ДСТУ 7809, %

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Cu
0.07-0.14	0.17-0.37	0.35-0.65	≤0.30	≤0.035	≤0.040	≤0.15	≤0.30

Таблиця 2 - Механічні властивості сталі 10 після нормалізації

Межа плинності, Н/мм ² , не менше	Межа короткочасної міцності, Н/мм ² , не менше	Мінімальне відносне подовження, %, не менше	Відносне звуження, %, не менше
205	330	31	55

Сталь марки 10 поширена через низьку вартість і високі експлуатаційні якості. Область застосування сталі марки 10 досить широка: листовий прокат для холодного штампування; деталі, від яких вимагається висока пластичність і збереження характеристик при температурі до +350°C, деталі після хіміко-термічної обробки з високими показниками твердості поверхні і зносостійкості (втулки, гвинти і т.д.); електрозварні труби для трубчастих електронагрівачів і деяких машинобудівних виробів, безшовні холоднодеформовані труби для котлів, нафто- і паропідігрівачів, основний шар при виробництві гарячекатаних двошарових корозійностійких листів, труби для гідравлічних систем автомобілів, комбайнів, тракторів, холодильників і т. п.

2 ЕЛЕМЕНТИ РОЗРАХУНКУ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ

2.1 Визначення середнього складу шихти

Вихідні дані для розрахунку

- Хімічні склади чавуну, скрапу, готового металу, наведені в таблиці 3.

Таблиця 1 - Хімічний склад вихідних матеріалів і продуктів, %

Найменування матеріалу	C	Si	Mn	P	S
Чавун	4,0	0,81	0,74	0,28	0,033
Скрап	0,25	0,10	0,50	0,04	0,04
Готова сталь 10 (ГОСТ 1050-88)	0,07-0,14	0,17-0,37	0,35-0,65	не більше 0,035	не більше 0,040

- Кількість у шихті, %: чавуну - 78; скрапу - 22.

Визначається середній склад шихти, кг:

	C	Si	Mn	P	S
Чавун вносити	3,12	0,632	0,577	0,218	0,026
Скрап вносити	0,055	0,022	0,11	0,009	0,009
Середній вміст	3,175	0,654	0,687	0,227	0,035
Метал перед розкисленням	0,07	-	0,185	0,020	0,025

Далі наводиться методика розрахунку середнього вмісту елемента в шихті на прикладі вуглецю:

чавун вносити	скрап вносити	середній вміст
$4,0 \cdot \frac{78}{100} + 0,25 \cdot \frac{22}{100} = 3,12 + 0,055 = 3,175 \text{ кг}$		

Аналогічно проводиться розрахунок середнього вмісту кожного елемента металеві частини шихти.

2.2 Визначення чаду хімічних елементів шихти, кг:

	Надійшло з шихтою	Залишилося в металі	Окислилося
C	3,175	$0,07 \cdot 0,9$	$= 3,112$
Si	0,654	0	$= 0,654$
Mn	0,687	$0,185 \cdot 0,9$	$= 0,521$
P	0,227	$0,020 \cdot 0,9$	$= 0,209$
S	0,035	$0,025 \cdot 0,9$	$= 0,013$
Fe(дим)		$= 1,5$	$\frac{\Sigma 6,009}{\Sigma 6,009}$

де 0,9 - вихід рідкої сталі.

2.3 Розрахунок витрати кисню на окислення домішок

Приймається, що 10% вуглецю окислиться до CO₂ і 90% вуглецю окислиться до CO:

Витрата кисню, кг

Маса оксиду, кг

$C \rightarrow CO_2$	$0,311 - 32 \div 12 = 0,829$	CO_2	1,140
$C \rightarrow CO$	$2,801 - 16 \div 12 = 3,735$	CO	6,536
$Si \rightarrow SiO_2$	$0,654 - 32 \div 60 = 0,747$	SiO_2	1,401
$Mn \rightarrow MnO$	$0,521 - 16 \div 55 = 0,152$	MnO	0,673
$P \rightarrow P_2O_5$	$0,209 - 80 \div 62 = 0,270$	P_2O_5	0,479
$Fe \rightarrow Fe_2O_3$	$1,500 - 48 \div 112 = 0,643$	Fe_2O_3 (у дим)	2,143

2.4 Розрахунок кількості та складу конвертерного шлаку

Основною складовою сталеплавильного шлаку є CaO, який надходить із вапна. Тому спочатку розраховується витрата вапна на плавку, що залежить від вмісту кремнію в шихті.

Витрату вапна, позначену через «Y», визначають за балансом CaO і SiO₂ у шлаку для забезпечення заданої основності

$$\frac{CaO}{SiO_2} = 3,0 \div 3,5$$

У шлак надійшло CaO (кг) з:

- футерування	$0,3 \cdot 0,02 = 0,006$
- плавикового шпату	$0,3 \cdot 0,035 = 0,011$
- вапна	0,86 Y
	<hr/>
	0,017 + 0,86 Y

У шлак надійшло SiO₂ (кг) з:

- металевої шихти	1,401 Y
- футерування	$0,3 \cdot 0,05 = 0,015 Y$
- плавикового шпату	$0,3 \cdot 0,03 = 0,009$
- вапна	0,02 Y
	<hr/>
	1,425 + 0,02 Y

Складаємо та розв'язуємо рівняння:

$$\frac{0,017 + 0,86 Y}{1,425 + 0,02 Y} = 3,5$$

Звідки витрата вапна $Y = 6,292$ кг.

Дані розрахунків складу шлаку зводяться в таблицю 4.

Таблиця 2 - Джерела та склад шлаку, кг

Вносять джерела		Вміст									
		SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	S	MnO	P_2O_5	Fe_2O_3	CaF_2
1	Металошихта	1,401	-	-	-	-	0,013	0,673	0,479	-	-
2	Футерування	0,015	0,006	0,210	0,009	0,036	-	-	-	0,024	-
3	Плавикий шпат	0,009	0,011	-	0,003	-	-	-	-	-	0,26
4	Вапно	0,126	5,428	0,126	0,126	-	-	-	-	-	-
	Разом	1,551	5,428	0,336	0,138	0,036	0,013	0,0673	0,479	0,024	0,26

Приймається вміст оксидів заліза в шлаку рівним 13% FeO і 4% Fe_2O_3 . Тоді, маса оксидів шлаку без FeO і Fe_2O_3 складе 83%, а маса шлаку без оксидів заліза - 8,914 кг (таблиця 4).

Далі розраховується маса шлаку, що дорівнює $8,914 : 0,83 = 10,740$ кг, зокрема 1,396 кг FeO і 0,430 кг Fe_2O_3 .

На основі відомої кількості шлаку можна розрахувати процентний вміст окремих складових (таблиця 5).

Таблиця 3 - Кількість складових шлаку, кг/%

	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	MnO	P_2O_5	Fe_2O_3	FeO	Cr_2O_3	CaF_2	Σ
кг	1,551	5,428	0,336	0,138	0,013	0,673	0,479	0,430	1,396	0,036	0,26	10,74
%	14,44	50,54	3,13	1,28	0,12	6,27	4,46	4,00	13,00	0,34	2,42	100

2.5 Розрахунок виходу рідкої сталі

У киснево-конвертерному процесі можливі втрати металу з чадом хімічних елементів, викидами, виносом і корольками в шлаку. При цьому в шлак переходить оксид заліза, кг:

$$Fe_2O_3 \quad 0,430 - 0,024 = 0,406$$

$$FeO \quad 1,396$$

і надійде заліза з металу в шлак, кг:

$$1,396 \cdot 56 : 72 + 0,406 \cdot 112 \cdot 160 = 1,086 + 0,284 = 1,370.$$

Вихід рідкої сталі складе, кг:

$$100 - 6,009 - 0,5 - 1,0 - 1,370 = 91,121,$$

де 6,009 - угар домішок шихти, кг;

0,5 - кількість заліза, що заплуталося в шлаку у вигляді корольків, кг;

1,0 - втрата заліза з викидами, кг;

1,370 - угар заліза на утворення оксидів заліза в шлаку, кг

2.6 Загальна витрата кисню на плавку

Як уже було підраховано раніше, витрата кисню на окислення домішок металошихти склала 6,376 кг. Однак, існує додаткова витрата кисню, зокрема на окислення заліза, що дорівнює

$$(1,396 - 1,086) + (0,406 - 0,284) = 0,432.$$

Усього знадобиться кисню на окислення хімічних елементів:

$$6,376 + 0,432 = 6,808 \text{ кг}$$

У технічному кисні міститься 99,5% кисню і 0,5% азоту. Кількість азоту становитиме:

$$6,808 \cdot 0,005 = 0,034 \text{ кг.}$$

Прийнято, що ванною засвоюється 95% кисню, що надходить. Кількість незасвоєного кисню становитиме:

$$(6,808 - 0,034) \cdot 0,05 = 0,339 \text{ кг.}$$

Маса технічного кисню, що надходить у конвертер, становитиме (на 100 кг металозавалки):

$$6,808 + 0,034 + 0,339 = 7,181$$

або

$$7,181 - 22,4 \div 32 = 5,027 \text{ м}^3 (50,27 \text{ м}^3/\text{т}).$$

2.7 Розрахунок кількості та складу газів

З раніше проведених розрахунків складається таблиця 6 кількості та складу газів.

Таблиця 4 - Кількість і склад газів

Складові	Вміст		
	кг	м ³	%
CO ₂	0,378 + 0,018 + 1,14 = 1,536*	0,782	17,92
CO	6,536	5,229	76,26
H ₂ O	0,126	0,157	1,47
O ₂	0,339	0,237	3,95
N ₂	0,034	0,027	0,40
Разом	8,571	6,432	100,00

2.8 Матеріальний баланс плавки до розкислення

На підставі проведених розрахунків, складається матеріальний баланс плавки, представлений у таблиці 7.

Таблиця 5 - Матеріальний баланс плавки

№ п/п	Надійшло	кг	№ п/п	Отримано	кг
1	Рідкий чавун	78	1	Рідка сталь	91,121
2	Скрап	22	2	Шлак	10,74
3	Плавииковий шпат	0,3	3	Корольки в шлаку	0,5
4	Вапно	6,292	4	Викиди	1,0
5	Розмив футерування	0,30	5	Гази	8,571
6	Технічний кисень	7,181	6	Fe ₂ O ₃ (дим)	2,143
	Разом	114,073		Разом	114,075

$$\text{Неузгодженість: } \frac{114,075 - 114,073}{114,075} \cdot 100 = 0,002\%$$

Допускається нев'язка не більше 0,5%.

3 Розкислення і легування сталі

Розкислення - це процес видалення зайвого кисню з металу різними способами.

Легування - це операція присадки в сталь легувальних елементів для надання їй будь-яких особливих фізико-хімічних або механічних властивостей (твердість, жароміцність тощо).

Як приклад проводиться розрахунок розкислення сталі марки 10, хімічний склад якої наведено в таблиці 3.

Як було прийнято раніше, в металі перед розкисленням міститься з урахуванням виходу рідкого металу (90%), кг:

$$C = 0,1 \cdot 0,9 = 0,09; \quad Mn = 0,185 \cdot 0,9 = 0,166; \quad Si = 0;$$

$$S = 0,025 \cdot 0,9 = 0,022; \quad P = 0,020 \cdot 0,9 = 0,018.$$

Необхідна кількість кожного феросплаву визначається за формулою

$$P = \frac{[\%E]_{г.с.} - [\%E]_{п.р.}}{\frac{[\%E]_{ф.}}{100} \cdot \frac{100 - Y}{100}}, \text{ кг} \quad (1)$$

де $[\%E]_{г.с.}$ - середній вміст елемента в готовій сталі, %;

$[\%E]_{п.р.}$ - вміст елемента в металі перед розкисленням, %;

$[\%E]_{ф.}$ - вміст елемента у феросплаві, %;

Y - чад елемента, %.

У подальших розрахунках прийнято таке випаровування елементів, %:

C - 15; Si - 25; Mn - 20; Cr - 15; V - 15; Ti - 90; Ni - 0.

Витрати феромарганцю і феросиліцію згідно з (1) дорівнюватимуть:

$$P_{FeMn} = \frac{(0,50 - 0,166)}{0,78 \cdot 0,80} = 0,535 \text{ кг,}$$

$$P_{FeSi} = \frac{0,27}{0,65 \cdot 0,75} = 0,554 \text{ кг.}$$

Хімічний склад феросплавів наведено в таблиці 2.

Кількість елементів, що вносяться феросплавами, наведено в таблиці 8.

Таблиця 6 - Кількість елементів, внесених у метал, кг

Елемент	Вноситься феромарганцем	Вноситься феросиліцієм	Всього
C	$0,535 \frac{7,0}{100} \cdot \frac{(100 - 15)}{100} = 0,032$	—————	0,032
Mn	$0,535 \frac{78}{100} \cdot \frac{(100 - 20)}{100} = 0,034$	$0,554 \frac{0,4}{100} \cdot \frac{(100 - 20)}{100} = 0,002$	0,336
Si	$0,535 \frac{1,0}{100} \cdot \frac{(100 - 25)}{100} = 0,004$	$0,535 \frac{65}{100} \cdot \frac{(100 - 20)}{100} = 0,270$	0,274
P	$0,535 \frac{0,35}{100} = 0,002$	$0,554 \frac{0,05}{100} = 0,0003$	0,002
Fe	$0,535 \frac{13,65}{100} = 0,073$	$0,554 \frac{34,55}{100} = 0,191$	0,264

Усього	0,445	0,463	0,908
--------	-------	-------	-------

Тоді вихід рідкої сталі, після розкислення, становитиме:

$$91,121 + 0,908 = 92,029 \text{ кг.}$$

Угар розкислювачів $0,535 + 0,554 - 0,908 = 0,181 \text{ кг.}$

Перевірка хімічного складу готової сталі, наведена в таблиці 9

Таблиця 7 - Склад готової сталі

Найменування	C	Mn	Si	P	S	Fe	Всього
Метал перед розкисленням, кг	0,09	0,166	0	0,018	0,022	90,825	91,121
Вносять феросплави, кг	0,032	0,336	0,274	0,002		0,264	0,908
Всього: кг	0,122	0,502	0,274	0,020	0,022	91,089	92,029
%	0,132	0,544	0,300	0,022	0,024	98,978	100

Отриманий хімічний склад готової сталі відповідає межам, передбаченим ГОСТ 1050-88. Остаточний матеріальний баланс представлений у таблиці 10.

Нев'язка не перевищує допустимого значення 0,5%.

Таблиця 8 - Матеріальний баланс плавки

Надійшло	кг	Отримано	кг
Рідкий чавун	78	Рідка сталь	92,029
Скрап	22	Шлак	10,74
Плавиковий шпат	0,3	Корольки в шлаку	0,5
Вапно	6,292	Викиди	1,0
Розмив футерування	0,30	Гази	8,571
Технічний кисень	7,181	Fe ₂ O ₃ (дим)	2,143
Розкислювачі	1,089	Угар розкислювачів	0,181
Всього	115,162		115,164

4 Тепловий баланс плавки

У киснево-конвертерному процесі нагрівання металу до заданої температури здійснюється завдяки внутрішнім джерелам тепла: фізичному і хімічному теплу чавуну і теплоті шлакоутворення.

Згідно із завданням дано витрату чавуну, їхній хімічний склад, раніше зроблено розрахунки, необхідні для складання теплового балансу, що містить прибуткову і видаткову частини.

Прихід тепла

1. Фізичне тепло чавуну, ккал (МДж)

$$Q_1 = [0,178 \cdot 1200 + 52 + 0,2(1300 - 1200)] \cdot 78 = 22277(93,340),$$

де 0,178 - середня теплоємність чавуну до температури плавлення, ккал/кг·град;

1200 - температура плавлення чавуну °С;

52 - прихована теплота плавлення чавуну, ккал/кг;

1300 - температура чавуну, за якої останній заливається в конвертер, °С;

0,2 - теплоємність рідкого чавуну, ккал/кг·град;

78 - частка чавуну в металошихті, кг.

2. Тепло екзотермічних реакцій, ккал (МДж)

$$C \rightarrow CO_2 \quad 8137 \cdot 0,311 = 2531$$

$$C \rightarrow CO \quad 2498 \cdot 2,801 = 6997$$

$$Si \rightarrow SiO_2 \quad 7423 \cdot 0,654 = 4855$$

$$Mn \rightarrow MnO \quad 1758 \cdot 0,521 = 916$$

$$P \rightarrow P_2O_5 \quad 5968 \cdot 0,209 = 1247$$

$$Fe \rightarrow Fe_2O_3 \quad 1758 \cdot 0,284 = 499$$

$$Fe \rightarrow FeO \quad 1150 \cdot 1,086 = 1249$$

$$Fe \rightarrow Fe_2O_3(\text{дим}) \quad 1758 \cdot 1,500 = 2637$$

$$\Sigma 20931 (87,701)$$

3. Тепло шлакоутворення, ккал (МДж)

$$554 \cdot 0,654 \cdot 60 \div 78 = 779$$

$$1132 \cdot 0,209 \cdot 142 \div 62 = 542$$

$$\Sigma 1321 (5,535)$$

Разом прихід тепла склав:

$$Q_{\text{прих}} = 22277 + 20931 + 1321 = 44529 \text{ ккал (186,965 МДж).}$$

Витрата тепла

1. Фізичне тепло сталі (при заданій температурі), ккал (МДж)

$$Q = [0,167 \cdot 1500 + 65 + 0,2(1630 - 1500)] \times \\ \times (91,121 + 0,5 + 1,0) = 31630(132,530),$$

де 0,167 - середня теплоємність сталі до температури плавлення, ккал/кг·град;

1500 - температура плавлення сталі, °С;

65 - прихована теплота плавлення сталі, ккал/кг;

0,2 - теплоємність рідкої сталі, ккал/кг·град;

1630 - температура сталі на випуску з конвертера, °С;

91,121 - вихід рідкої сталі до розкислення, кг;

0,5 і 0,1 - втрата металу з корольками і викидами відповідно, кг.

2. Фізичне тепло шлаку, ккал (МДж)

$$Q_2 = (0,298 \cdot 1630 + 50) \cdot 10,74 = 5754(24,109),$$

де 0,298 - середня теплоємність шлаку, ккал/кг·град;

1630 - температура шлаку, °С;

50 - прихована теплота плавлення, ккал/кг;

10,74 - вихід шлаку, кг.

3. Втрата тепла (приймаємо 5% від приходу), ккал (МДж)

$$Q_3 = 44529 \cdot 0,05 = 2226(9,329).$$

4. Частинки Fe_2O_3 виносять тепло, ккал (МДж)

$$Q_4 = 0,294 \cdot 1500 \cdot 2,143 = 9,45,06 (3,960),$$

де 0,294 - теплоємність пилу, ккал/кг·град;

1500 - температура частинок пилу, °С;

2,143 - кількість частинок пилу, Fe_2O_3 (дим), кг.

5. Димові гази забирають тепло, ккал (МДж)

$$CO_2 \quad 814 \cdot 0,782 = 636$$

$$CO \quad 506 \cdot 5,229 = 2646$$

$$H_2O \quad 632 \cdot 0,157 = 99$$

$$O_2 \quad 528 \cdot 0,237 = 125$$

$$N_2 \quad 499 \cdot 0,027 = 13$$

Всього: 3519 ккал (14,745 МДж)

Разом витрата тепла становила:

$$Q_p = 31630 + 5754 + 2226 + 945 + 3519 = 44074 \text{ ккал (184,670 МДж).}$$

Надлишок тепла:

$$44529 - 44074 = 455 \text{ ккал (1,906 МДж).}$$

Тепловий баланс плавки

	Прихід тепла			Витрата тепла			
	ккал	МДж	%	ккал	МДж	%	
Фізичне тепло чавуну	22277	93,340	50,03	Фізичне тепло: сталі	31630	132,530	71,03
Тепло екзотермічних реакцій	20931	87,701	47,00	шлаку	5754	24,109	12,92
Тепло шлакоутворення	1321	5,535	2,97	Втрати тепла з газами	3519	14,745	7,90
				Втрати тепла через футеровку і горловину	2226	9,329	5,0
				Втрати тепла з Частинками Fe_2O_3	945	3,960	2,12
				Надлишок тепла	455	1,906	1,03
Всього	44529	186,576	100,00	Всього	44529	186,579	100,00

Коригування теплового балансу плавки

Ентальпія 1 кг сталі за температури 1600 °С становитиме 345 ккал (1,446 МДж).

У цьому випадку надлишку тепла достатньо на розплавлення $\frac{445}{345} = 1,32$ скрапу додатково. Отже, в цих розрахунках слід було б прийняти в шихті 77% (кг) чавуну і 23% (кг) скрапу.

У разі нестачі тепла виправлення теплового балансу можливе за рахунок:

- зміни в допустимих межах температури чавуну, що заливається, і сталі на випуску;
- присадок вуглецевмісного матеріалу (коксу, графіту, антрациту тощо) з урахуванням їхньої теплотворної здатності, що дорівнює 8000 ккал/кг, і коефіцієнта корисного використання тепла $\eta = 0,27 - 0,35$.

3 ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ МЕТОДИ В ПРОЦЕСІ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ СТАЛІ

3.1 Аналіз методів енергозбереження в процесі конвертерної плавки сталі

У сучасних умовах підвищення ефективності киснево-конвертерного процесу пов'язане з використанням нових технічних рішень на базі прогресивних ресурсозберігаючих технологій.

Існують різні варіанти вирішення головних завдань сучасного киснево-конвертерного виробництва:

1. Одержання після закінчення продування конвертерної ванни неметалевого напівпродукту і шлаку із заданим хімічним складом і

температурою за мінімальних витрат матеріальних та енергетичних ресурсів - нерозривно пов'язане з оптимізацією параметрів дуттьових режимів і пристроїв.

З урахуванням провідної ролі реакційної зони взаємодії кисневих струменів з ванною на хід рафінування розплаву на цьому етапі важливо отримати відсутню інформацію про режими взаємодії багатоструменевого верхнього кисневого дуття з конвертерною ванною. Це необхідно для усвідомленого управління процесами перерозподілу кисню, що вдувається, між металічною, шлаковою і газовою фазами робочого простору конвертера, а також для придушення інтенсивного витікання з реакційної зони крапель металу та шлаку, що призводить до утворення неметалошлакових настилів на стволі кисневого дуття і горловині конвертера.

Актуально в нових напрямках реалізувати комплекс високотемпературних і чисельних досліджень гідрогазодинамічних особливостей поведінки конвертерної ванни, щоб отриману інформацію використати для оптимізації режимів дуття й нанесення шлакообробних магнезійальних матеріалів, а також розроблення високостійких конструкцій наконечників кисневих фурм, що забезпечують як дуття конвертерної ванни, так і нанесення шлакового гарнісажу на футеровку агрегату.

2. Розроблення ресурсо- та енергозберігаючої технології конвертерної плавки зі збільшеною витратою брухту в металошихті.

У реальних умовах роботи конвертерних цехів аналіз теплового балансу плавки за мінливих параметрів металозавалювання показує, що з позиції енергозбереження на сьогоднішній день перспективними є технології, які передбачають попереднє нагрівання брухту в порожнині конвертера кусковим або порошкоподібним вуглецевмісним паливом з виключенням утворення зон локального проплавлення шихти і високоокисленого рідкого металевого напівпродукту. У цих умовах до числа найважливіших належать проблеми розроблення оптимальних конструкцій дуттьових пристроїв, варіантів технології попереднього підігріву брухту з використанням вуглецевмісних теплоносіїв і подальшого продування конвертерної ванни, які забезпечують належні

показники перебігу шлакоутворення, видалення шкідливих домішок і стійкості футерування агрегату.

Тому розвиток теоретичних засад і практичних аспектів розроблення та вдосконалення в нових напрямках технології конвертерної плавки зі збільшеною переробкою попередньо підігрітого металевого брухту є актуальним завданням сьогодення.

3. До числа найактуальніших і найважливіших проблем енергозбереження належить розробка оптимальної технології продування конвертерної ванни з допалюванням газів, що відходять, у робочому просторі агрегату.

У повсякденній практиці роботи конвертерних цехів Росії нині часто використовують застарілі дуттьові пристрої та технології, що не відповідають сучасному рівню ресурсо- та енергозбереження, тому розвиток теоретичних і практичних аспектів розроблення нових дуттьових пристроїв для вдосконалення технологічних параметрів продування конвертерної ванни є актуальним завданням сьогодення.

Оскільки вирішення останньої проблеми є більш фінансово та економічно вигідним, поговоримо про це більш детально.

3.2 Сучасний стан теорії та напрями розвитку способів продування конвертерної ванни

Представлено аналіз літературних даних про сучасний стан і напрямки розвитку ресурсо- та енергозберігаючих технологій конвертування металу, зокрема верхнього і комбінованого продування розплаву з використанням кисню і нейтрального газу.

Показано, що суттєвим резервом ефективного використання власних енергетичних ресурсів під час виплавки сталі в кисневому конвертері є збільшення ступеня допалювання CO до CO₂ у робочому просторі агрегату. Проаналізовано сучасні технічні рішення цього питання. Визначено основні проблеми, пов'язані з аерогідродинамічними та тепломасообмінними умовами

конвертерної плавки. Наголошено на недостатній кількості надійних відомостей щодо конструктивного оформлення кислородних фурм та обґрунтованих рекомендацій щодо технологічних параметрів продувки, які забезпечили б підвищення ефективності окисного рафінування та відповідні умови допалювання газів, що відходять.

З урахуванням проаналізованих даних визначено основні напрями досліджень з метою отримання інформації, якої бракує, щодо аерогідродинамічних і тепломасообмінних закономірностей продування конвертерної ванни з допалюванням монооксиду вуглецю, розроблення технологічних рекомендацій і промислових конструкцій кисневих фурм, що забезпечують підвищення енергозберігаючої ефективності процесу.

3.3 Дослідження продування конвертерної ванни газовими струменями з різним динамічним напором

До складу установки входять змінні багатоцільові конвертери садкою 60 і 150 кг, що мають профіль і розміри 1:17 і 1:12 лінійної величини 160-т конвертерів, 150-кг індукційна піч, а також кисневі фурми верхнього дуття різних конструкцій і донні фурми подачі нейтрального газу.

Для вивчення гідрогазодинамічних закономірностей продування використано вдосконалені методики "оглядового вікна" і "прозорої стінки", фотографічної пірометрії та фотокінозйомки макрофізичних явищ, що відбуваються під час продування.

Попередньо для визначення оптимальних варіантів конструкцій сопел і головки фурми виконано чисельно-аналітичне дослідження руху розплаву в зоні продування. На рис. 1 показано схему продування конвертерної ванни струменями з різним динамічним напором. Кисневі струмені, впроваджуючись у розплав, утворюють локальні реакційні зони з характерним розподілом температур, швидкостей і концентрацій газів.

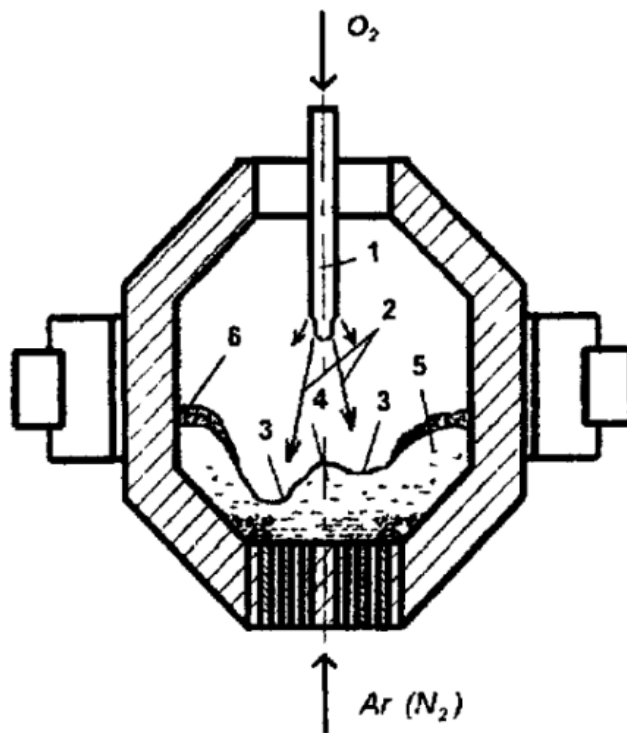


Рис. 1 - Схема продування конвертерної ванни струменями з різним динамічним напором

1 - фурма, 2 - кисневі струмені, 3 - реакційні зони, 4 - узагальнена зона продування, 5 - периферійна зона ванни, 6 – шлак

В об'ємі ванни можна виділити узагальнену зону продувки з прилеглими безпосередньо до реакційних зон ділянками металу і периферійну зону металу, що не проміщується. В узагальненій зоні продувки за рахунок різної величини динамічних напорів окремих кисневих струменів, що витікають із сопел різного діаметру, відбувається витіснення різних обсягів металу з кожної реакційної зони з розвитком відцентрових сил і обертального руху розплаву в напрямку динамічного напору, що зменшується.

Рух розплаву, що переміщується, в поверхневому шарі зони продувки розглянуто в класі плоских усталених потенційних течій нестисливої рідини, що з певними припущеннями відповідає моделі наближеного опису реального процесу, згідно з якою для випадку продування незаглибленою фурмою поверхня реакційної зони, що має форму параболоїда обертання, ніби стискається в площину й, таким чином, здійснюється перехід до класу плоскоусталених течій рідини.

На основі такого підходу проведено чисельні експерименти. В експериментах використано одно- і двопотокові фурми з соплами різного діаметру як у внутрішньому, так і зовнішньому контурі головки фурми. Загальна інтенсивність продування киснем зверху становила 2,5-4,0 м³/т·хв, нейтральним газом (аргон, азот) знизу - 0,01-0,2 м³/т·хв.

З початком продування кожен із кисневих струменів, що потрапляють на ванну, утворює окремих, відкритої форми кратер. Внаслідок різного тиску окремих кисневих струменів на ванну, фіксуються різні розміри кратерів і різна інтенсивність турбулізації стінок останніх. У тому випадку, коли тиск окремого струменя перебуває в межах 835-2055 Па, відбувається "запалювання" операції у відповідних відокремлених реакційних зонах, пов'язане з інтенсивним розвитком пило- та бризкоутворення.

З подальшим підвищенням тиску струменів на ванну (P=2875-3600 Па) реалізується режим глибокого проникнення дуття в розплав, що характеризується ще інтенсивнішим залученням об'ємів металу в кисневий струмінь, розвиненою пульсацією і схлопуванням країв окремих кратерів за періодичного виділення з них макрооб'ємів монооксиду вуглецю під час зневуглицювання ванни.

Встановлено, що внаслідок різної величини тиску окремих кисневих струменів на ванну відбувається неоднаковий вихід макрооб'ємів СО і перехід металу з однієї реакційної зони в іншу. Додатковий обертальний поверхневий рух ванни призводить до зниження інтенсивності спрямованого виносу металевих бризок з реакційної зони на ствол фурми і горловину конвертера.

У разі наведення шлаку на поверхні металу і глибокого проникнення дуття в умовах роз'єднаної взаємодії кисневих струменів із металом в інтервалі тисків струменів (P=4000-14900 Па) фіксуються два режими.

Режим (I) наведення шлаку з продуванням ванни "заглибленим" струменем (P=4000-10065 Па), пов'язаний з утворенням газошлакометалевої емульсії, підйомом і порівняно постійною фіксацією її рівня вище зрізу голівки фурми без виникнення викидів. За таких умов вихід газоподібних продуктів з окремих реакційних зон через шар емульсії (рис. 2) відбувається переважно

односторонніми окремими проривами відносно вертикальної осі агрегату.

Режим (II) "жорсткого продування ($P > 14250$ Па) розвивається в період інтенсивного зневуглецювання ванни і характеризується "згортанням" шлаку, відтисненням останнього потоком монооксиду вуглецю, який виходить з реакційної зони, до футерування конвертера і наступним продуванням дзеркала чистого металу. На відміну від звичайного багатосоплового продування, у цьому разі розвивається переважно одностороннє виділення газів з реакційної зони.

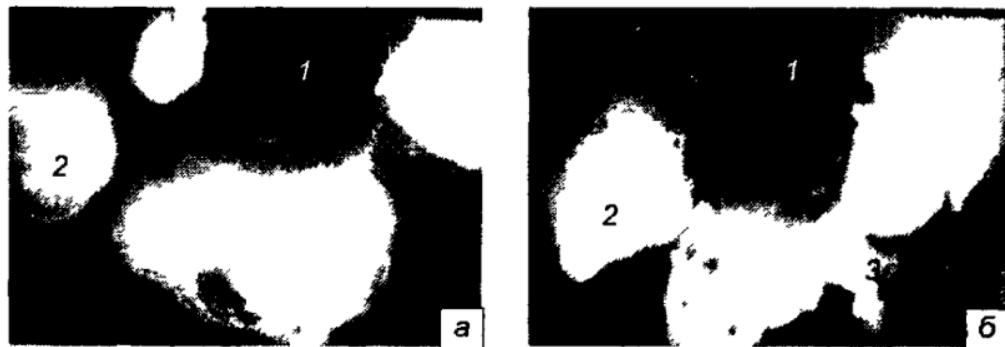


Рис. 2 - Картина продування конвертерної ванни 5-ти сопловою фурмою в режимі наведення шлаку

1 - фурма, 2 - вихід CO з реакційних зон, 3 - поверхня шлаку

На рис. 3 показано зміну відносного діаметра реакційних зон (рис. 3, а), відносної швидкості руху (рис. 3, б) та відносної масової витрати рідкого металу (рис. 3, в) за об'ємом конвертерної ванни для умов експерименту під час продування струменями з різним динамічним напором через чотири- і п'ятисоплову фурми; за характерний розмір узяті кут розвороту за перерізом конвертера, що дало змогу оцінити зміну характеристик із врахуванням компонування сопел в використовуваних фурмах.

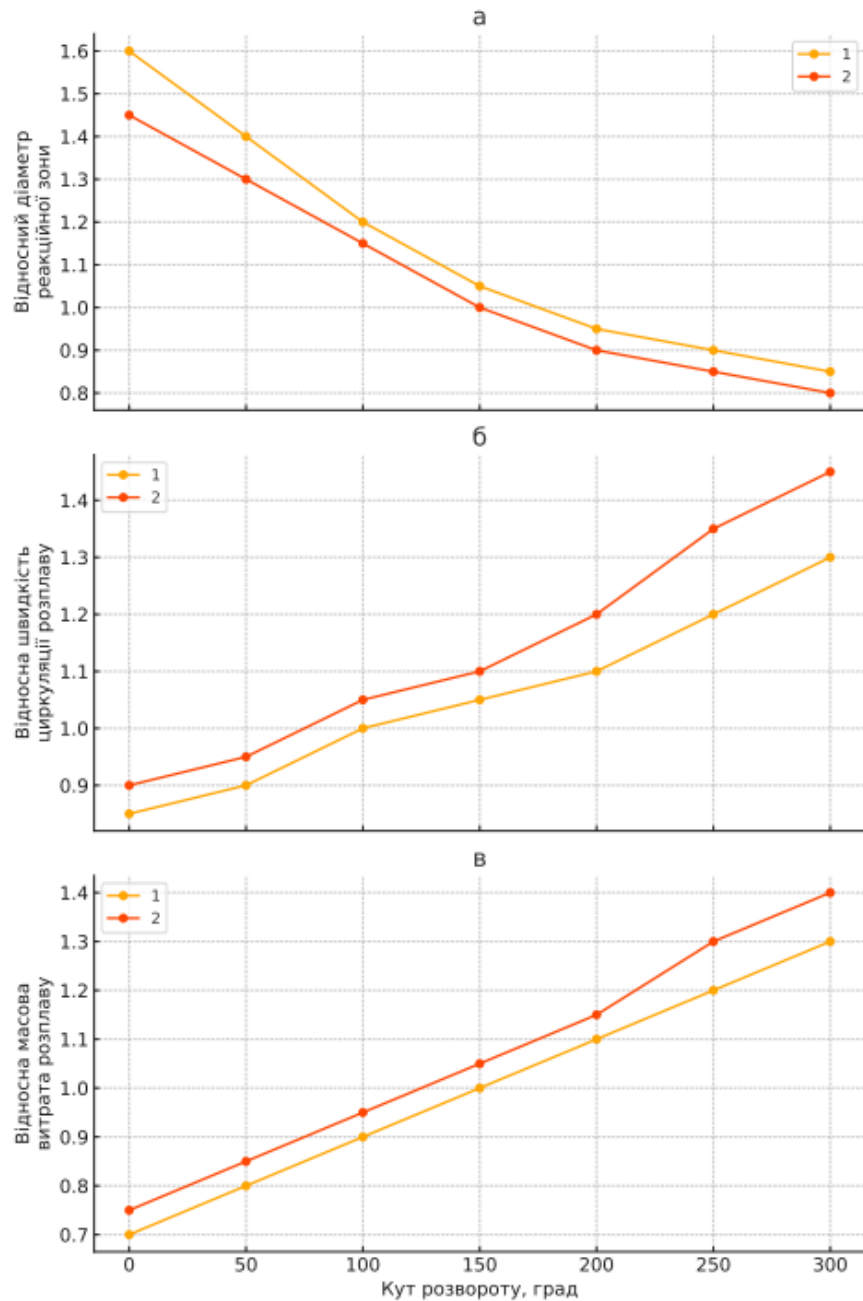


Рис. 3 - Зміна відносних параметрів дуття за об'ємом конвертерної ванни під час продування струменями з різним динамічним напором

1 - чотирисоплова фурма, 2 - п'ятисоплова фурма

Розрахункова сумарна інтенсивність циркуляції рідкого металу за обраних параметрів продування струменями з різним динамічним напором у 1,05-1,15 разів перевищує відповідні значення для звичайного продування струменями рівного імпульсу, що підтверджує зафіксовану кінозйомкою поведінку реакційної зони.

Для визначення параметрів узагальненої реакційної зони за стабілізованого виходу продуктів окислення вуглецю на поверхню ванни

використано результати раніше виконаних досліджень. Отримані результати представлено на рис. 4.

Дослідження показали, що в міру збільшення максимального імпульсу кисневих струменів спостерігається збільшення діаметра узагальненої реакційної зони, причому для продування струменями з різним динамічним напором отримані значення в 1,10-1,20 рази вищі за відповідні значення для звичайного продування.

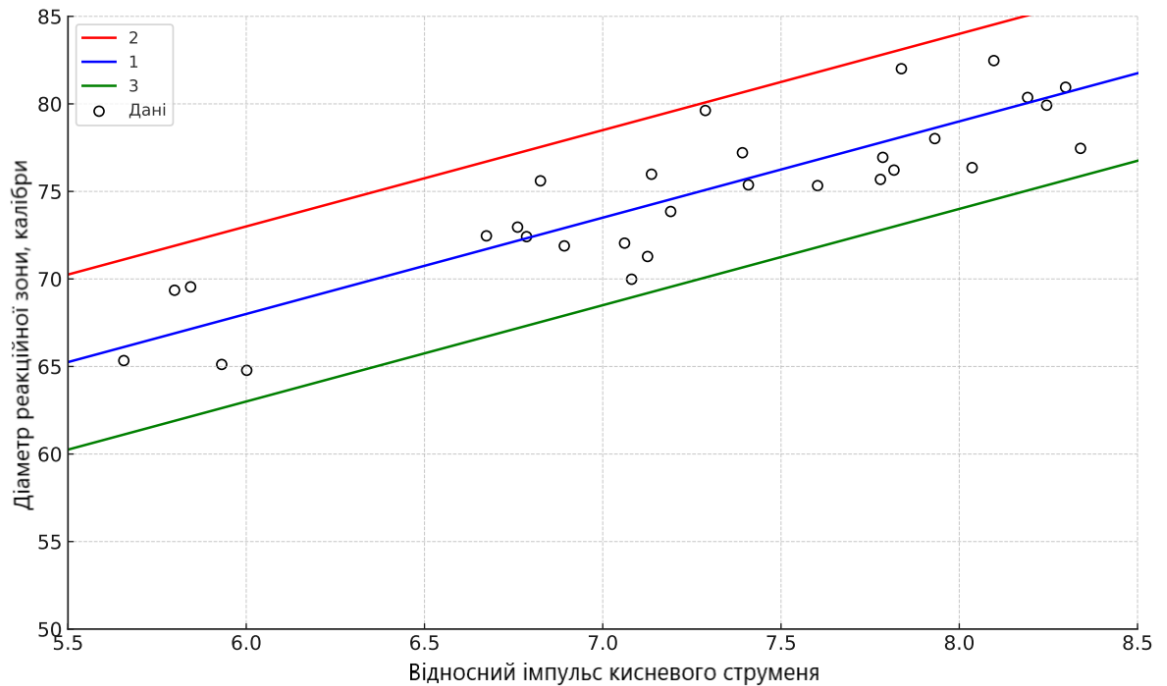


Рис. 4 - Вплив параметрів дуттьового режиму на розміри узагальненої реакційної зони (крапки біля ліній - дані експериментальних плавок)

1 і 2 - чотири- і п'ятисоплова фурми із соплами різного діаметра, 3 - звичайна чотирисоплова фурма

Експерименти з вивчення гідродинаміки ванни на конвертері з "прозорою" стінкою при комбінованому продуванні показали, що подача перемішувального газу з витратою 0,01-0,2 м³/т·хв практично не позначалася на розвитку процесу зневуглицювання в об'ємі ванни за межами верхніх реакційних зон, але сприяла зниженню окиснюваності шлаку і температурної неоднорідності розплаву.

З погляду організації допалювання аналіз відхідних конвеєрних газів показав, що більш раціонально створювати за допомогою основних кисневих струменів, які подають на продування ванни через сопла різного діаметру внутрішнього контуру голівки фурми, об'єднану реакційну зону відкритої форми

інтенсивного виділення монооксиду вуглецю, а додатковими кисневими струменями, що виходять із сопел різного діаметру зовнішнього контуру, допалювати CO до CO₂ у "свищовому" потоці газів, що відходять, нижче за поверхню ванни. При цьому оптимальна витрата додаткового кисню через сопла зовнішнього контуру становить 10-25% від загальної на продування. У цьому разі при зміні числа і діаметрів сопел у зовнішньому контурі головки, витрати кисню через них при оптимальній робочій висоті фурми над ванною забезпечується потрібний режим взаємодії струменів із розплавом та ефективно допалювання газів, що відходять.

3.4 Дослідження процесів гідродинаміки і теплообміну при продувці конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів

Для дослідження перемішування і теплообміну в розплаві за різних варіантів продування розроблено і реалізовано математичну модель гідродинаміки і теплопереносу в конвертері під час продування розплаву киснем через верхню фурму і нейтральним газом через днище.

На першому етапі моделювання не розглядалися процеси, що протікають у шлаковій фазі, а газометалева фаза конвертера представлено як газорідне середовище з невеликими значеннями коефіцієнта газомісту у «вакуумному» наближенні: у нехтуванні густиною газу порівняно з густиною розплаву.

Для отримання повнішої гідродинамічної картини в робочому просторі агрегату розроблену модель розширено з урахуванням особливостей динаміки газошлакової фази, що утворюється в процесі плавки. Модель побудована аналогічно представлений, оскільки і газометалева, і газошлакова фази є газорідними середовищами. Така постановка задачі дала змогу доповнити граничні умови, одержати інформацію щодо кінематичних і динамічних параметрів взаємодії матеріалів, які присаджуються в процесі плавки, врахувати реальні розміри, кут нахилу і форму реакційної зони в умовах верхнього і комбінованого продування киснем і нейтральним газом.

Аналіз чисельних величин швидкостей висхідних і низхідних потоків і газовмісту ванни дав змогу уточнити повну гідродинамічну картину в робочому просторі агрегату за різних режимів подачі дуття і видати рекомендації для вдосконалення технологічних параметрів конвертування металу. Результати розрахунків виконано для умов 160-тонних конвертерів (рис. 5).

Для дослідження особливостей допалювання конвертерних газів, що відходять, розроблено математичну модель, що являє собою спільне розв'язання задачі газодинаміки і теплообміну.

Газодинамічні дослідження дають змогу визначити середні швидкості узагальненого газового потоку в об'ємі конвертера, профілі поздовжніх швидкостей, а також поля густини газів (кисню, монооксиду і двооксиду вуглецю) в хімічно нерівноважній концентрації з урахуванням тільки ефектів нагрівання й охолодження газів, що відходять, унаслідок зміни тиску.

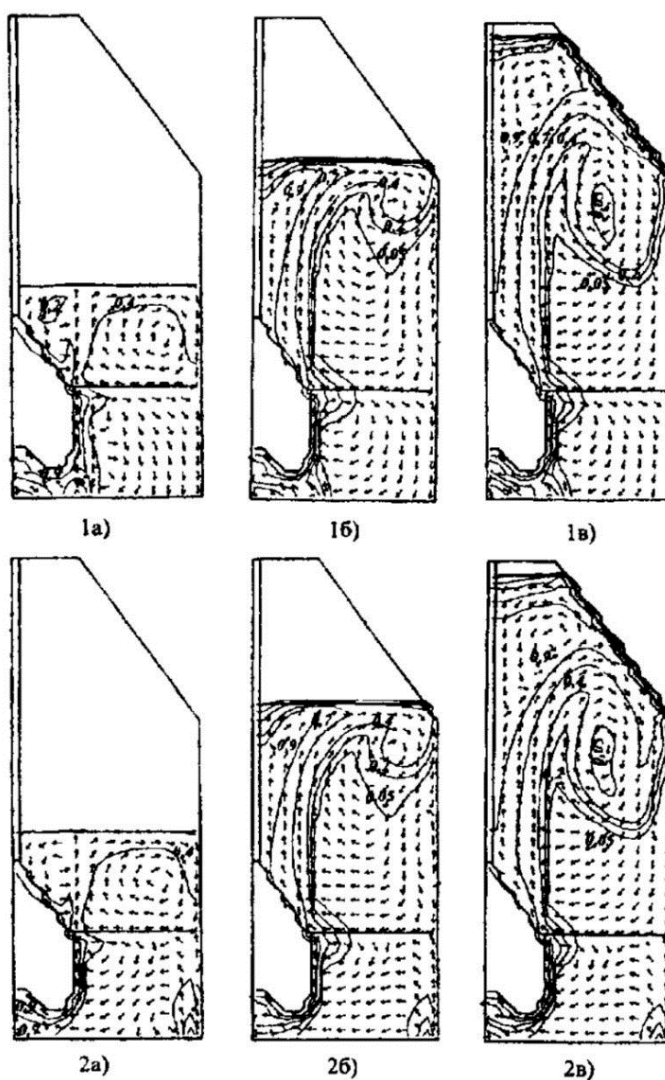


Рис. 5 - Динаміка газометалевої та шлакової фаз у порожнині конвертера за різних варіантів продування:
а, б, в - рівень шлаку, 1,5, 3,5 і 5,5 м відповідно; 1,2 - радіус розташування донних фурм 1 і 2,6 м

Для повнішого врахування реальної термодинаміки та хімічної кінетики процесу течії газів, що відходять, у кисневому конвертері надалі введено хімічні реакції, що дало змогу уточнити поля температур з урахуванням турбулентного тепломасопереносу і теплообміну на межах розрахункової області.

Після розрахунку кожного варіанта й уточнення розподілу концентрацій газів (кисню, монооксиду та двооксиду вуглецю) визначено показники процесу допалювання відхідних газів у конвертері: коефіцієнт допалювання; довжину факела горіння кисневих струменів, які подають на допалювання; адіабатичну температуру горіння з урахуванням тепломасопереносу і температуру на кордоні розрахункової області, яка відповідає температурі футеровки.

Аналіз чисельних розрахунків за запропонованою методикою показує добру збіжність із відомими промисловими даними, що доводить адекватність запропонованої математичної моделі та дає змогу досліджувати процес допалювання газів, що відходять, у конвертері за різного конструктивного оформлення кисневої фурми в широкому інтервалі зміни витрат на допалювання і продування розплаву.

Розрахунки підтвердили можливість збільшення коефіцієнта допалювання при підвищенні відносної витрати вторинного дуття(Q_2 / Q_1) (рис. 6).

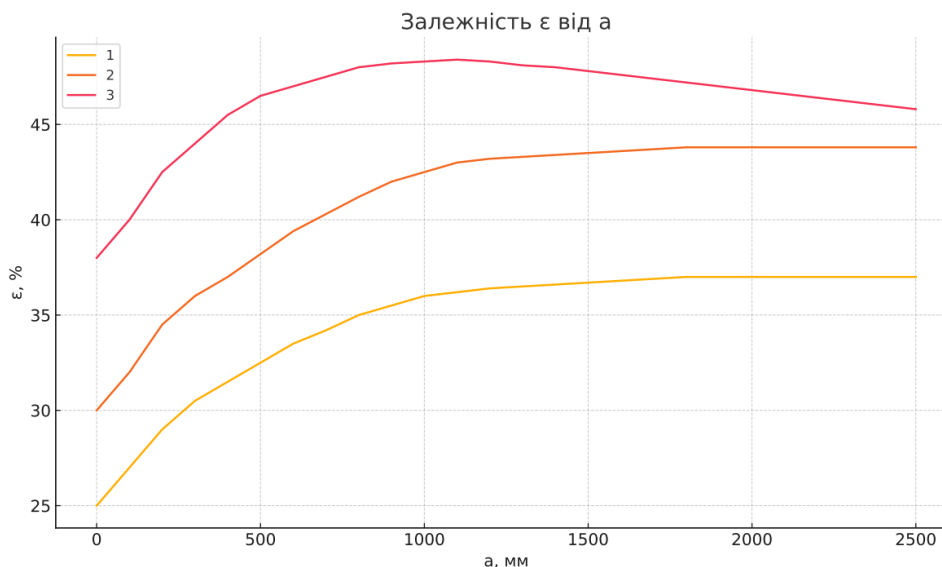


Рис. 6 - Залежність коефіцієнта допалювання газів, що відходять, від висоти подавання вторинного потоку кисню за базового співвідношення витрат дуття на допалювання та продування ($Q_2/Q_1=20\%$):

1, 2, 3 - кути нахилу сопел опалювання 30, 45, 120 відповідно, град

Було встановлено, що вплив цього параметра має оптимальні межі (0,15-0,30), за якими подальше збільшення недоцільне. Зафіксований вплив величини кута нахилу сопел вторинного дуття до вертикальної осі фурми на коефіцієнт допалювання показує суттєве зростання до 45° , причому характер залежності в кожному випадку визначається висотою розташування сопел допалювання від зрізу головки фурми.

Зіставлення розрахункових значень факела допалювання, що утворюється, підтверджує принципово різний механізм теплопередачі при спіненому і неспіненому шлаку (рис. 7).

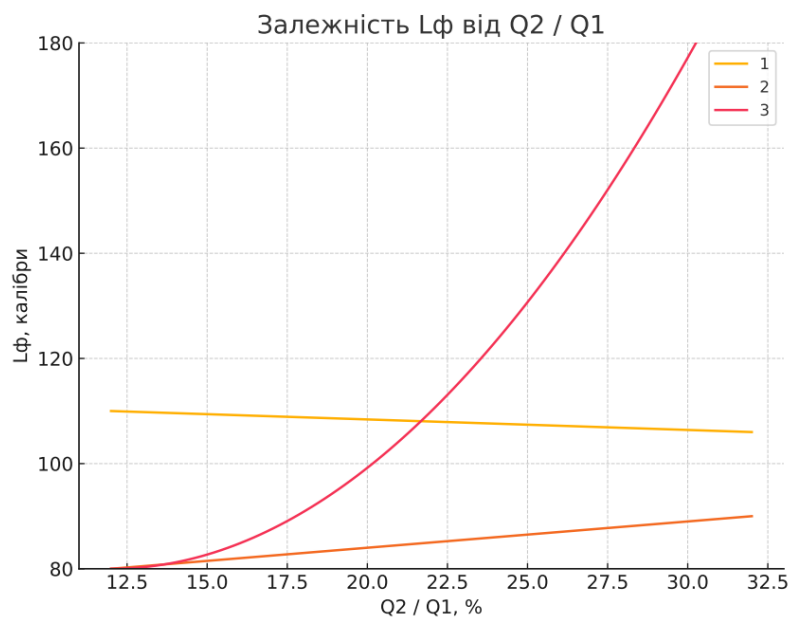


Рис. 7 - Вплив співвідношення витрат дуття на допалювання і продування на зміну довжини факела:

1,2,3- відстань між потоками дуття 100, 1200, 2500 відповідно, мм

У разі використання двоярусної фурми (рис. 7, лінії 2, 3) фіксується помітне збільшення розмірів факела у вільному об'ємі конвертера і, відповідно, вищі значення коефіцієнта допалювання, але результати розрахунку адіабатичної температури допалювання конвертерних газів, що відходять, показали, що максимальна температура досягається за умови зниження висоти подачі дуття на допалювання до 100 мм (двоконтурна фурма), що свідчить про вищий ступінь засвоєння тепла. Таким чином, для збільшення теплопередачі у ванні доцільно допалювання монооксиду вуглецю у спіненому шлаку під час використання двоконтурних фурм.

Під час опрацювання даних в інвентарі параметрів дуттьових режимів плавки, які трапляються в промисловій практиці, визначено рекомендації для проектування двопотокових кисневих фурм, які забезпечують продування конвертерної ванни та ефективно допалювання конвертерних газів, що відходять, в об'ємі агрегату.

3.5 Удосконалення дуттьових пристроїв і способів верхнього та

комбінованого продування киснем і нейтральним газом у 160-тонному конвертері

Серед великої різноманітності відомих комбінованих процесів найбільшого поширення набули варіанти, що поєднують верхнє кисневе продування з донним перемішуванням розплаву різними газоподібними реагентами. При цьому найкращі результати досягаються в разі поєднання зазначеної технології з додатковим післяпродувальним перемішуванням розплаву нейтральним газом після закінчення кисневого продування. Для визначення впливу післяпродувального перемішування на закономірності зміни технологічних параметрів 160-тонної конвертерної плавки виконано аналіз результатів, отриманих під час комбінованої продувки до і після додаткового післяпродувального перемішування ванни нейтральним газом. Для дослідження відібрано такі групи дослідних плавок: початок кампанії конвертора з футерування (20 - 60 плавок від початку кампанії, донні фурми відкриті, футерування днища агрегату без шлакового гарнісажу) - струменевий режим витікання; середина кампанії конвертера з комбінованим продуванням (200-400 плавка, донні фурми під гарнісажем) - бульбашковий режим витікання. На всіх проведених дослідних плавках постійно в роботі фіксували 6-10 донних фурм.

Результати досліджень представлені на рис. 8.

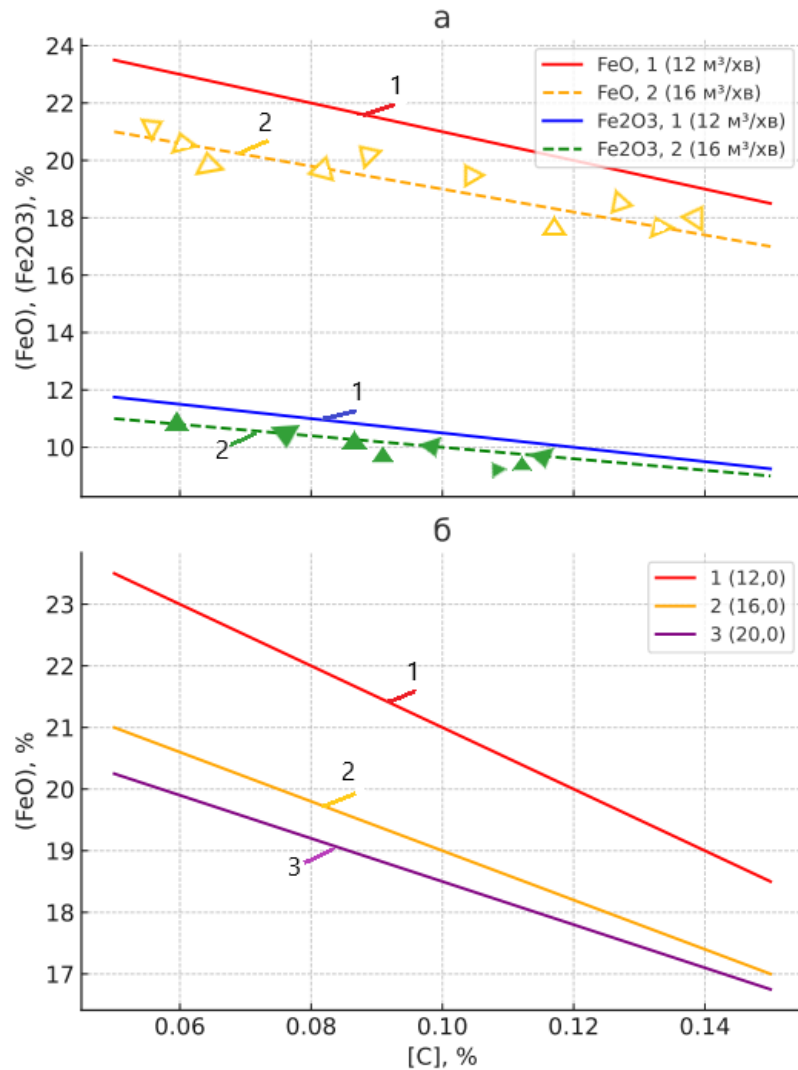


Рис. 8 - Вплив залишкової концентрації вуглецю в металі на окисленість кінцевого шлаку:

до продування (—) і після продування (- -) нейтральним газом (16 м³/хв);

▼, ▽ - донні фурми під гарнісажем; ▲, △ - донні фурми відкриті

Встановлено, що за достатньої тривалості перемішування (3...4 хв) ефективність розкислення шлаку вища за струменевої подачі дуття, ніж за бульбашкового режиму, коли донні фурми перебувають під гарнісажем (див. рис. 8). При перемішуванні ванни з високою витратою газу 18...24 м³/хв через відкриті донні фурми протягом усього періоду обробки за вмісту вуглецю 0,10...0,16 % зниження вмісту монооксиду заліза в кінцевому шлаку перебуває в межах 1,5...3,25 %.

Зазначено, що паралельно зі зневуглицюванням відбувається подальше зниження кінцевого вмісту фосфору в металі. Найбільш значно на дефосфорацію впливає температура розплаву (рис. 9).

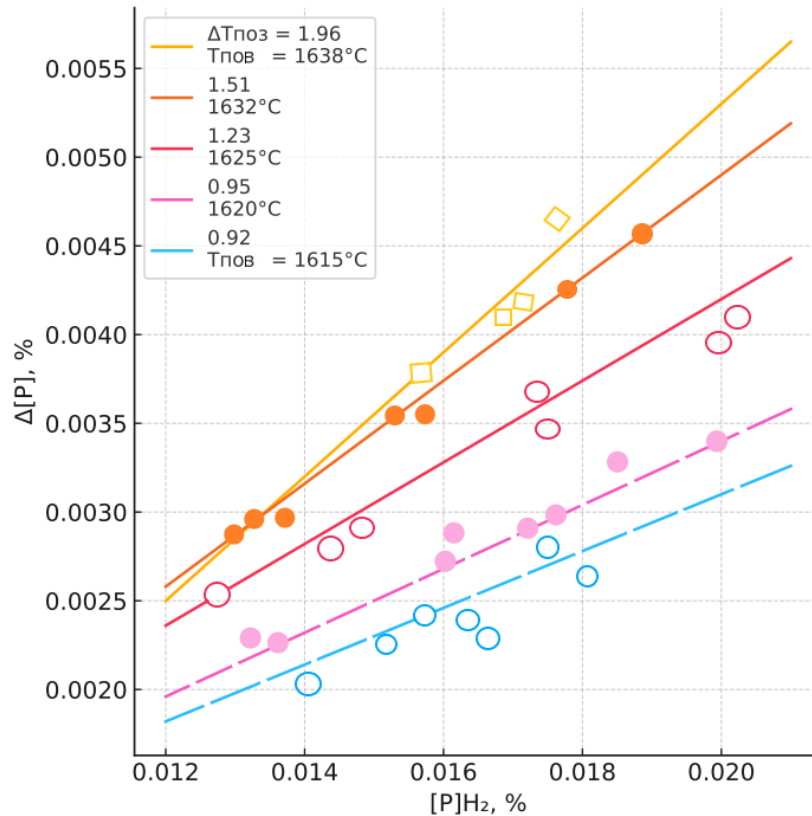


Рис. 9 - Зміна вмісту фосфору в металі:

донні фурми під гарнісажем (—) і відкриті (- -), \circ \bullet і \square - витрата азоту 12, 16 і 20 м³/хв

У процесі післяпродувального перемішування внаслідок збільшення поверхні взаємодії зниження температури ванни відбувається значно швидше. У цих умовах поліпшення параметрів дефосфорації у зв'язку з більш значним зниженням температури розплаву можливо очікувати за більшої тривалості обробки і збільшенні витрати перемішувального газу. Однак таке технічне рішення негативно позначиться на показниках роботи донних фурм і стійкості днища загалом.

Перспективнішим, очевидно, буде використання в цей період для додаткового охолодження ванни присадки таких матеріалів, як вапно або "холодний" конвертерний шлак. Водночас слід зазначити, що за вмісту фосфору в металі менше ніж 0,010% до моменту закінчення кисневого продування подальше післяпродувальне перемішування протягом двох і більше хвилин не приносить користі для охолодження ванни, призводить до помітної зміни вмісту фосфору в металі. Додаткове продукування нейтральним газом призводить до

деякого звуження області розкиду значень коефіцієнта розподілу сірки, однак відчутних результатів поліпшення знесірчення металу зафіксувати не вдалося.

При використанні азоту як нейтрального перемішувального газу збільшення інтенсивності та тривалості післяпродувального оброблення металу на дослідних плавках призводить до незначного підвищення вмісту азоту в металі - на 0,0001 -0,0003%. Отримане збільшення вмісту азоту в готовій сталі не перевищує норм, встановлених вимогами стандарту, водночас зафіксоване збільшення складно однозначно віднести саме за рахунок реалізації технології післяпродувального перемішування розплаву.

Стосовно умов роботи 160-тонних конвертерів встановлено, що післяпродувальне перемішування конвертерної ванни нейтральним газом сприяє розкисненню крейди і шлаку, проведенню подальшої дефосфорації, а також наближає процес до рівноваги. Проте зниження енергоємності конвертерного процесу може бути забезпечено лише за рахунок розроблення нових конструкцій кисневих фурм.

Під час проектування кисневих фурм з метою забезпечення простоти виготовлення, високої стійкості та надійності за основу було взято п'ятиканальну кисневу фурму. Водночас розроблені голівки фурм мають дворядне розташування сопел за двома концентричними колами. Циліндричні сопла зовнішнього контуру та проточки для охолоджувальної води виконують свердлінням у суцільноточених мідних корпусах, що дає змогу різко зменшити кількість зварних швів і, відповідно, поліпшити охолоджену воду.

У першому варіанті фурми внутрішній контур виконаний у складі чотирьох сопел Лаваля з критичними діаметрами, що послідовно зменшуються від сопла до сопла.

У другому варіанті для організації ефективнішого допалювання газів, що відходять, кисневу фурму виконано із соплами зовнішнього контуру попарно рівного перерізу, до того ж сопла максимального перерізу зовнішнього контуру розташовані з боку сопла мінімального критичного діаметра внутрішнього контуру.

Такий перерозподіл низькошвидкісних кисневих струменів для

допалювання відносно поверхні рідкої ванни та оксиду вуглецю, який виділяється, дасть змогу підвищити ступінь використання кисню на допалювання, знизити окисленість шлаку і металу, зменшити втрати металу і ймовірність викидів шлаку з конвертера.

У третьому варіанті конструкції кисневої фурми сопла внутрішнього контуру виконані різного критичного діаметру з додатковим розташуванням на внутрішній поверхні сопел шліців. У цьому разі реалізується варіант продування так званими складовими струменями з різним динамічним напором. Виконання шліців у дифузорі сопла Лаваля дає можливість одержати складові струмені, що складаються з надзвукового осьового струменя, оточеного дозвуковим кільцевим струменем.

У процесі промислових досліджень під час використання розробленої конструкції кисневої фурми зі шліцевими соплами різних діаметрів насамперед вирішувалося завдання відпрацювання раціонального дуттьового режиму плавки, що забезпечує отримання належних техніко-економічних показників.

Визначена на підставі досліджень висота фурми для основних періодів верхнього кисневого продування у 160-тонному конвертері за постійної витрати кисню $400 \text{ м}^3/\text{хв}$ становила 1,8 і 2,8 м відповідно.

Режим дуття і присадок сипучих на всіх дослідних плавках тримався однаковим і в разі необхідності коригувався в ході операції. Частка перероблюваного брухту становила 25-28 % від загальної ваги металозавалки в 162-163 т, при цьому шихтування плавок і завантаження конвертера залишалися практично без змін відносно зіставлюваної технології комбінованого дуття.

Основні технологічні та техніко-економічні показники дослідних і порівняльних плавок подано в таблиці 1.

Отримані результати свідчать про те, що за однакових умов ведення продування розроблена конструкція фурми забезпечує більш "гарячий" хід плавки та істотне поліпшення низки технологічних показників.

Поліпшення теплової роботи агрегату, зумовлене збільшенням ступеня допалювання CO до CO₂, підтверджено даними дослідних плавок з додатковим контролем роботи газовідвідного тракту за ходом продування (рис. 10).

Як видно, продування конвертерної ванни з використанням розробленої конструкції кисневої фурми стабілізує й істотно збільшує інтенсивність утворення двоокису вуглецю в порожнині конвертера впродовж усього часу продування (див. рис. 10).

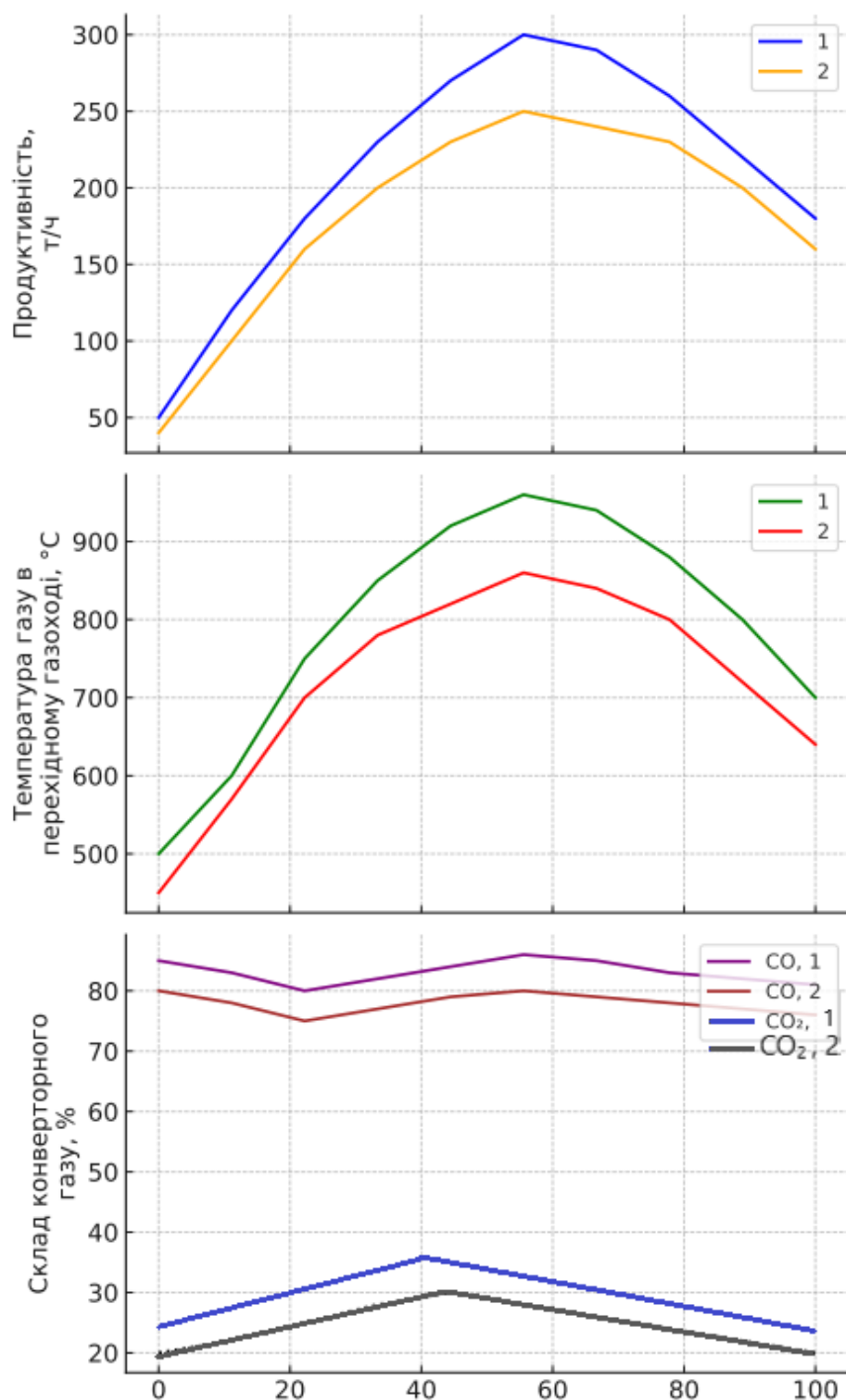


Рис. 10 - Динаміка основних параметрів конвертерних газів за ходом продування

1 - верхнє кисневе продування зі звичайною фурмою, 2 - продування

складовими струменями з різним динамічним напором

Максимальна кількість двооксиду вуглецю утворюється в початковий період продування, а не в середині операції за інтенсивного зневуглецювання, що пов'язано, мабуть, зі зміною протікання гідродинамічних процесів у зоні продування та рівнем спіненої ванни. У разі продування конвертерної ванни складовими струменями з різним динамічним напором інтенсифікується допалювання відхідних газів. Струмені різного імпульсу утворюють різну для кожної реакційної зони кількість газоподібних продуктів із виходом газів під час спрямованого переміщення "свища" з боку сопла мінімального перерізу.

Основні технологічні показники плавки під час продування ванни з використанням фурм різної конструкції представлено в табл. 1.

Таблиця 1 - Основні технологічні показники плавки під час продування ванни з використанням розробленої (А) і звичайної (Б) конструкції фурми

Показники	Варіанти	
	А	Б
	середнє значення	середнє значення
1. Кількість плавки	104	180
2. Витрата матеріалів, кг/т додатних злитків		
чавуну	801,0	806,7
брухту	300,4	295,3
вапна	60,73	63,15
розріджувача	1,93	2,46
антрациту	5,81	6,02
3. Витрата кисню на плавку, м ³ /т додатних злитків	50,2	51,8
4. Тривалість продування	19,5	21,0

Продовження табл. 1

5. Температура чавуну, що заливається, °С	1335	1350
---	------	------

6. Вміст у чавуні, %		
Si	0,57	0,57
Mn	0,48	0,50
S	0,026	0,023
P	0,19	0,19
7. Температура металу, °C	1610	1600
8. Вміст у металі, %		
C	0,12	0,12
Mn	0,18	0,16
S	0,016	0,020
P	0,015	0,016
9. Вміст у шлаку, %		
FeO	18,16	19,92
MgO	1,5	1,9
10. Основність шлаку, од	2,9	2,6
11. Вихід рідкої сталі, %	90,5	90,3

На остаточному етапі продування, незважаючи на зниження швидкості окислення вуглецю та загальне зниження кількості вуглецевоактивних конвертерних газів, спостерігається деяке зростання вмісту CO₂ у відхідних газах, що імовірно, досягається також за рахунок зниження рівня спіненого шлаку в конвертері та поліпшення перемішування металу і шлаку в разі продування складовими струменями з різним динамічним напором. Середньомасовий для даних характерних плавок вміст двоокису вуглецю в газах, що відходять з конвертера, становить 17,33 і 19,48 % відповідно для порівняльних і дослідних плавок.

Аналізовані дослідні плавки характеризувалися спокійним перебігом продувки і незначною кількістю викидів, зниження частки чавуну в металозавалці становило 5,7 кг/т, при цьому спостерігалось збільшення вмісту марганцю в металі на повалці на 0,02% і виходу рідкої сталі на 0,2%.

Загалом необхідно зазначити, що зміна температурних умов процесу,

прискорення й оптимізація параметрів шлакоутворення, скорочення так званого періоду "відкритого" продування без шлаку дало змогу скоротити витрату вапна на 2-3 кг/т і зменшити кількість розріджувачів, які додаються, в середньому на 0,5 кг/т, водночас одержати більшу основність кінцевого шлаку та сприятливіші умови для видалення сірки й фосфору з металу.

Аналіз отриманих результатів дає змогу стверджувати про перспективність продування конвертерної ванни струменями з різним динамічним напором.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота присвячена сталеплавильному виробництву, а саме виплавці сталі в кисневих конверторах. На сьогоднішній день більшість металургійних підприємств застосовують саме кисневі конвертери для виплавки сталі, зокрема й АрселорМіттал Кривий Ріг, власне тому було використано і показано цей спосіб у роботі.

1. У роботі запропоновано нові конструкції фурм зі шліцьовими соплами, різним критичним діаметром та двоярусною організацією подачі кисню, що дозволяє підвищити ефективність допалювання, зменшити турбулентність у зоні вдування і мінімізувати винос металевих бризок.

2. Було виконано детальні розрахунки сталі 10:

- **матеріального балансу** з урахуванням хімічного складу шихти, виходу сталі, утворення шлаків і побічних продуктів;
- **витрати кисню** на основні окислювальні реакції та на допалювання оксидів вуглецю;
- **теплого балансу плавки**, який засвідчив значний тепловий потенціал екзотермічних реакцій і вплив правильного шлакоутворення;
- **процесу розкислення та легування**, що дозволив отримати готову сталь із показниками, які відповідають вимогам ДСТУ 7809 та ГОСТ 1050-88.

Матеріальний і тепловий баланси зведені з мінімальною похибкою ($<0,5\%$), що підтверджує достовірність та точність проведених розрахунків.

3. На основі проведених досліджень рекомендовано до впровадження **інноваційні конструкції дугтьових фурм**, які забезпечують:

- підвищення ступеня допалювання CO до CO₂ до 85–90%;
- зниження окисленості шлаку;
- зменшення втрат металу на 3–5%;
- стабілізацію температурного режиму плавки;
- продовження ресурсу футерування конвертера.

Впровадження запропонованих рішень у виробничу практику конвертерного цеху дозволить досягти суттєвого підвищення

енергоефективності плавки, покращити екологічні показники та забезпечити сталість якості готової продукції.