

Харченко Олександр Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3717-3872

Воляр Роман Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-7299-0053

Юров Михайло Юрович, здобувач PhD, Запорізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТКИ БРУХТУ НА ОПТИМАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

В роботі проведено дослідження впливу частки брухту і інших шихтових матеріалів на оптимальні параметри киснево-конвертерної плавки на основі термодинамічного аналізу системи «метал-шлак-газ» з використанням методу хімічних потенціалів Гіббса. За допомогою програмного комплексу «Excalibur» виконано експериментально-обчислювальне моделювання і системний аналіз комплексу параметрів киснево-конвертерної плавки, які є взаємопов'язаними функціями тиску (включаючи феростатичний тиск металу), температури чавуну, температури і хімічного складу сталеплавильної ванни у конвертері, шлакового режиму плавки, вихідних мас сталевих і чавунного брухту, розмивання футерівки, підігріву матеріалів, маси кисню на плавку, маси флюсуючих матеріалів, а також низки інших технологічних і геометричних параметрів кисневого конвертера. З використанням симплекс-методу лінійного програмування виконано оптимізацію параметрів киснево-конвертерної плавки за декількома варіантами. Побудовані графічні залежності впливу частки мас матеріалів, зокрема брухту, на вміст хімічних елементів в кінцевому напівпродукті і шлаку. Проаналізовано технологію киснево-конвертерної плавки з підвищеним вмістом брухту і зниженим вмістом рідкого чавуну в шихтових матеріалах. Визначено вплив фізичних і хімічних показників шихтових матеріалів на параметри теплової роботи конвертерів, можливість часткової заміни чавуну в шихті металобрухтом з метою економії чавуну і підвищення техніко-економічних показників плавки. Технологію з підвищеним вмістом брухту і зниженим вмістом рідкого чавуну в шихтових матеріалах рекомендовано для виплавки низьковуглецевих марок сталі. Зроблено висновок, що для одержання високоякісної сталі з конвертерного напівпродукту потрібно забезпечити позапічну обробку з глибоким розкисленням і десульфуріацією.

Ключові слова: сталь, киснево-конвертерна плавка, шлак, шихтові матеріали, метод Гіббса, хімічний склад, оптимізація, система «метал-шлак-газ»

Вступ. Одним із завдань киснево-конвертерного сталеплавильного процесу є контроль його результатів за хімічним складом готової сталі, що належить до складних завдань, оскільки пов'язане з протіканням складних фізико-хімічних процесів, частина з яких важко керована або зовсім некерована.

При оптимізації киснево-конвертерного процесу і систем автоматизованого управління плавкою сталі завдання зводиться до прогнозування складів і кількостей продуктів плавки за заданих початкових умов (склад і кількості шихтових матеріалів, що поступають в металургійний агрегат, напівпродукту, синтетичних шлаків, флюсів, легуючих матеріалів, розкислювачів та ін.). При цьому увесь процес виплавки сталі являє послідовність однорідних циклів, наприклад, розплавлення, знеуглецювання, розкислювання, доведення та ін. На початку кожного циклу в агрегаті знаходяться деякі початкові матеріали, у кінці – продукти їх взаємодії, що дозволяє в простому випадку описати усю плавку повторенням одного і того ж програмного блоку. Для спрощення часто розглядається не уся металургійна система в цілому, а лише частина, найбільш

суттєва з точки зору поставленого завдання. Через складний взаємозв'язок параметрів і чинників, що визначають сталеплавильне виробництво, математична модель плавки завжди є складною системою рівнянь, рішення якої стосовно умов реальних процесів зустрічає певні труднощі.

Математична модель плавки служить основою для створення її алгоритму, під яким розуміють повний і точний опис обчислювального процесу, що дозволяє з початкових даних отримувати шуканий результат. Алгоритм плавки зазвичай дещо ширше за математичну модель, оскільки він може включати окрім математичного опису, ще логічні умови, статистичну адаптацію і інші елементи.

До теперішнього часу розроблено багато математичних моделей плавки сталі, які часто ділять на термодинамічні (зазвичай рівноважні або квазірівноважні), кінетичні (в тому числі побудовані з використанням термодинаміки безповоротних процесів), статистичні та ін. Про це свідчать численні міжнародні симпозиуми по сучасних методах комп'ютерного моделювання сталеплавильних процесів. Зокрема на 4-й Європейській міжнародній конференції технологій й використання сталі ESTAD-2019 (Дюсельдорф) [1] і 9-й Європейській міжнародній конференції з киснево-конвертерного виробництва EOSC-2022 (Аахен) [2] дослідниками було відмічено, що стосовно процесів виробництва сталі використання комп'ютерних технологій в останні два десятиліття забезпечило істотний прогрес в частині забезпечення підвищення її якості, а також посиленні методів контролю відповідності металопродукції заданим технічним умовам.

Інтеграція різних аспектів детермінованої фізико-хімічної моделі плавки на основі методу хімічних потенціалів Гіббса у рамках одного пакету призвела до розробки програмного комплексу «EXCALIBUR» [3-4], в якій вперше в повному обсязі реалізовані пряма і зворотна задачі сталеплавильного виробництва, які працюють в тандемі. Алгоритм прямої задачі заснований на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази і її наступних модифікаціях [5-6], ентальпійном тепловому балансі [7] і обліку кінетичного запізнювання [8]. У алгоритмі зворотної задачі реалізований універсальний метод фазових операторів, окремим випадком якого є диференціальні коефіцієнти засвоєння в металі [2, 9].

У цій роботі програмний комплекс «EXCALIBUR» використовується як інструмент експериментально-обчислювального дослідження впливу частки брукху на оптимальні параметри киснево-конвертерної плавки.

Постановка завдання. На основі розроблених алгоритмів прямої та зворотної задачі провести моделювання процесів в кисневому конвертері, визначити оптимальні параметри плавки в ході продування киснем, зокрема вплив частки брукху і інших шихтових матеріалів на вміст хімічних елементів в металі і шлаку.

Основна частина дослідження. За допомогою програмного комплексу «EXCALIBUR» провели обчислювальний експеримент проплавлення киснево-конвертерної плавки низьковуглецевого напівпродукту за наступних умов:

- середньозважений тиск з урахуванням феростатичного тиску 150 кПа;
- масовий вміст вуглецю в напівпродукті не менше 0,025%;
- дозволені: брукх А (80 т), брукх чавуну (5 т), рідкий чавун переробний при 1350 °С (300 т), боксит (0...2 т), вапно (0...10 т), кисень (0...25 т), футерівка (0...1 т);
- маса кінцевого напівпродукту не менше 350 т;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 20$ °С.

Для виконання роботи завантажили проєкт TiTKV.fwp, обрали завдання «Хід продувки O_2 » і перевірили наступні опції: модель металу; модель шлаку; розрахунок кінцевої температури; точний склад кінцевої проби металу; елементний склад шлаку. Отримані дані розрахунків занесені в таблицю 1.

За результатами обчислювального експерименту з використанням програмного комплексу «EXCALIBUR» побудовані графічні залежності. На рис. 1 показано зміну складу металу за вуглецем і кремнієм при збільшенні витрати матеріалів на плавку.

З даних, наведених на графіку рис 1а, збільшення витрати кисню від 0 до 100% призводить до зміни вмісту кремнію з 0,657 до 0,005% та вуглецю від 3,5 до 0,03% в кінцевому напівпродукті. Це пояснюється тим, що при підвищенні маси кисню на плавку зростає ступінь окислення вказаних домішок в металі. Окислення вуглецю

відбувається в основному безпосередньо за рахунок дуття. Реакція окислення вуглецю практично незворотна, тобто монооксид вуглецю, що утворився, безперервно покидає зону реакції, і підвищення температури сприяє прискоренню реакції зневуглецювання. Швидкість окислення вуглецю по ходу продування змінюється в широких межах – від 0,10 до 0,40 %/хв.

На рис. 1б показано зміну складу металу за марганцем і киснем при збільшенні витрати матеріалів на плавку. При збільшенні витрати кисню від 0 до 100% вміст марганцю в кінцевому напівпродукті знижується з 0,4 до 0,06%. Одночасно відбувається збільшення вмісту кисню в металі від 0 до 0,098% (980 ppm).

Таблиця 1 – Вихідні дані і результати розрахунків киснево-конвертерної плавки

Матеріали	Витрата кисню, вапна, бокситу, футерівки, % від загальної маси на плавку					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Брухт А, т	80	80	80	80	80	80
Брухт чав., т	5	5	5	5	5	5
Чавун пер., т	300	300	300	300	300	300
Боксит, т	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
Вапно, т	0	2	4	6	8	10
Футерівка, т	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Кисень, т	0	5	10	15	20	25
Загальна маса ШМ, т	385	393,4	401,8	410,2	418,6	427
Вартість ШМ, у.о.	80800	81318	81836	82354	82872	83390
Склад металу, мас. %						
[C]	3,428	3,041	2,051	1,1	0,28	0,03
[Si]	0,657	0,072	0,121	0,127	0,051	0,005
[Mn]	0,408	0,358	0,37	0,0357	0,266	0,066
[S]	0	0,038	0,037	0,038	0,04	0,041
[P]	0,021	0,021	0,022	0,022	0,021	0,004
[O]	0	0,026	0,01	0,007	0,014	0,098
М мет. т	376,6	372,8	369,2	365,6	361,7	354,6
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)		0,166	0,293	0,625	2,879	25,03
(SiO ₂)		58,74	41,79	33,02	28,82	19,53
(MnO)		3,106	2,015	2,12	3,911	5,464
(S)		0,112	0,135	0,116	0,06	0,038
(P ₂ O ₅)		0,003	0,003	0,007	0,089	0,51
(Al ₂ O ₃)		3,316	4,849	5,543	5,59	4,33
(CaO)		28,96	42,66	49,06	49,12	37,76
(MgO)		5,655	8,326	9,562	9,564	7,356
Осн-ть шл.		0,593	1,235	1,795	2,065	2,38
М шлаку, т		8,265	11,14	14,5	19,285	31,34
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}		1,491	1,491	1,489	1,466	1,363
{CO ₂ }		0,0065	0,0062	0,0087	0,031	0,134
М газу, т		3,68	12,48	20,82	28,025	31,2
V газу, тис.м ³		38,231	112,472	183,31	243,171	256,636
Температура, °C		1266	1350	1425	1507	1614
Тепл. еф., ГДж		76,3	117,625	157,319	200,815	256,264

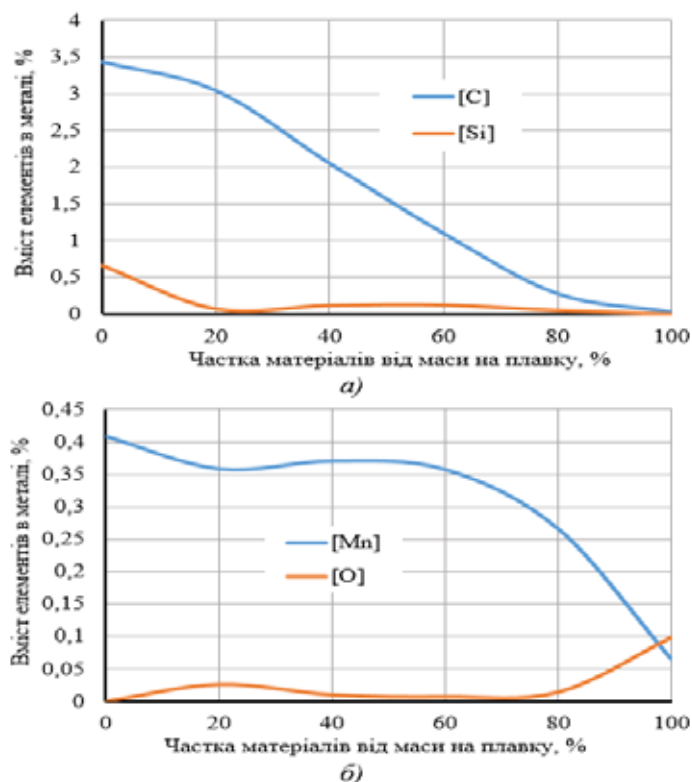


Рисунок 1 – Залежність вмісту вуглецю та кремнію (а), марганцю та кисню (б) у кінцевому напівпродукті від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

На кривій вмісту марганцю спостерігається характерний локальний максимум завдяки підвищенню температури металу і шлаку в процесі плавки і зміщенню термодинамічної рівноваги у бік відновлення. Аналогічний ефект спостерігається також для фосфору і кремнію [10-11].

На рис. 2а показано зміну складу шлаку за оксидами заліза, кремнію і кальцію при збільшенні витрати матеріалів на плавку. При збільшенні витрати кисню на плавку відбуваються екзотермічні реакції окислення заліза і кремнію.

Це підтверджується зміною вмісту FeO в шлаку з 0,166 до 25%. Одночасно відносний вміст SiO₂ у шлаку знижується з 58 до 19%, оскільки відбувається збільшення вмісту вапна CaO в шлаку, який частково витісняє FeO з силікату заліза.

На рис. 2б показано зміну складу шлаку за оксидами марганцю, алюмінію і магнію, а на рис. 2в за сіркою і оксидом фосфору при збільшенні витрати матеріалів на плавку.

Відповідно на рис. 3 показано зміну маси шлаку і газу, а на рис. 4 – зміну температури напівпродукту.

Характер зміни більшості кривих на графіках рис. 1 – 4 носить поступальний характер і криві зміни вуглецю та кисню у металі не мають істотних особливостей у вигляді локальних екстремумів.

Разом з тим, на графіках залежності складу шлаку від частки відданих матеріалів є виражені максимуми вмісту CaO, MgO, Al₂O₃ (рис. 2а, б), що пояснюється різким збільшенням вмісту FeO в шлаку при частці відданих матеріалів 80% і вище.

Протягом всієї плавки спостерігається монотонне збільшення маси шлаку і газу від 0 до 31 т (рис. 3). Також по мірі зниження змісту вуглецю зменшується відносна частка CO в газовій фазі. Крім того, має місце зростання основності шлаку з 0,6 до 2,3 одиниць, що відповідає вимогам технологічних параметрів конверторної плавки. Вміст P₂O₅ в шлаку збільшується синхронно зі збільшенням FeO в шлаку і вмістом кисню в металі (рис. 2 в). Середня температура металу росте по ходу плавки до 1614 °С, причому найбільш інтенсивне зростання температури відповідає частці відданих матеріалів 20% і менше (рис. 4).

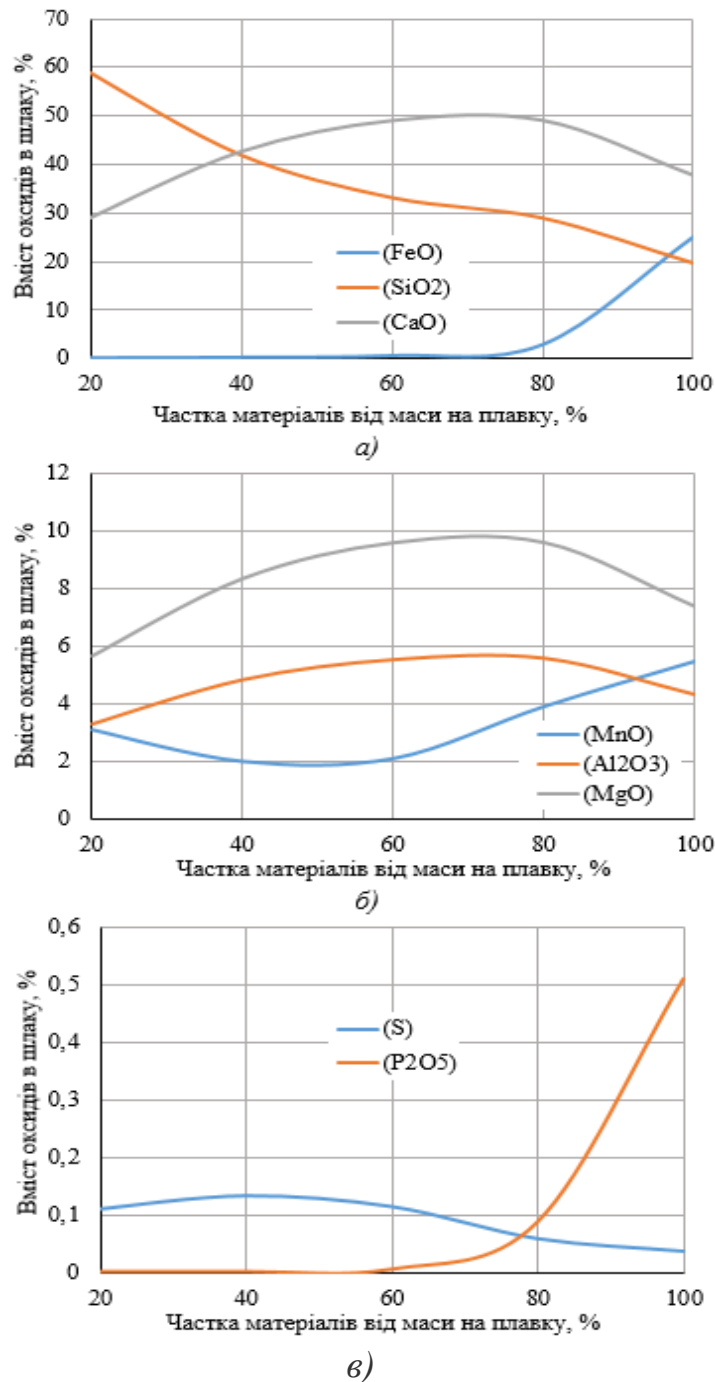


Рисунок 2 – Залежність вмісту оксидів заліза (FeO), кремнію (SiO₂) і кальцію (CaO) (а), марганцю (MnO), алюмінію (Al₂O₃) і магнію (MgO) (б), сірки (S) і оксиду фосфору (P₂O₅) (в) в шлаку від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

Дані, отримані в результаті проведення обчислювальних експериментів, порівняли з відомими експериментальними даними. Порівняння показало гарну відповідність розрахункових і експериментальних даних, які підтверджують адекватність термодинамічної моделі, використаної для розрахунку прямої задачі.

Оптимізація витрати кисню і чавуну на киснево-конвертерну плавку з основною футерівкою.

На основі алгоритму зворотної задачі термодинамічного аналізу визначили оптимальний набір матеріалів, зокрема маси чавуну і кисню, при заданому кінцевому стані системи за наступних умов:

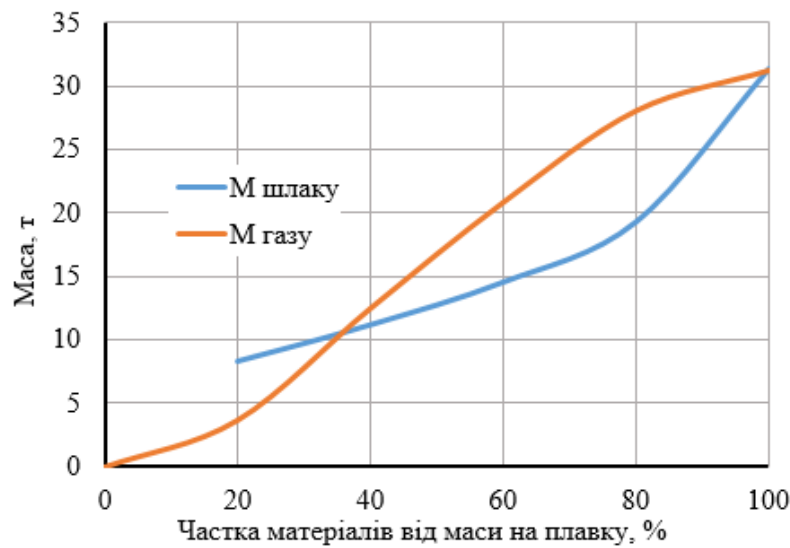


Рисунок 3 – Залежність маси шлаку та маси газу від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

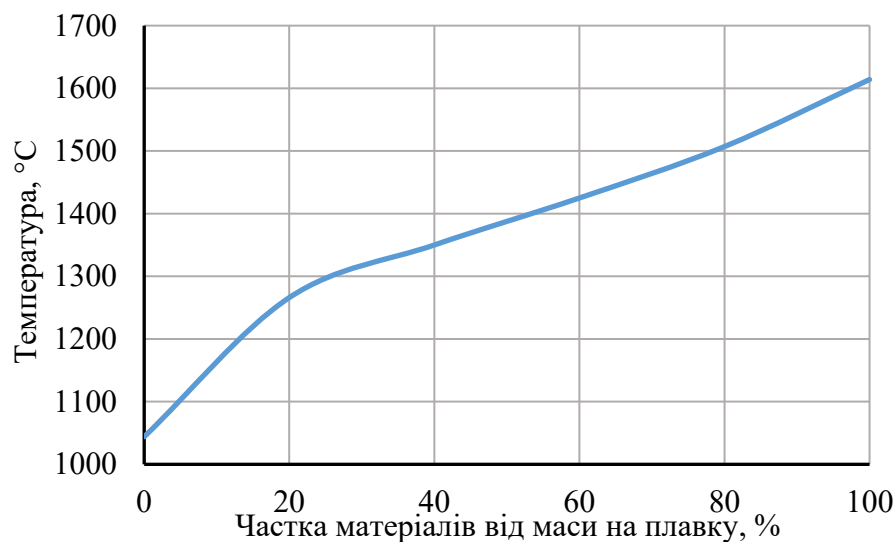


Рисунок 4 – Залежність температури кінцевого напівпродукту від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

- середньозважений тиск з урахуванням феростатичного тиску 150 кПа;
- масовий вміст вуглецю в напівпродукті 0,02.0,12%;
- дозволені: брухт А (≤ 100 т) з фіксованою часткою 15.20%, брухт чавуну (5 т), рідкий чавун переробний при 1350 °C (≤ 315 т), боксит (2 т), вапно (≥ 10 т), кисень (20.26 т); футерівка (1 т);
- маса кінцевого напівпродукту не менше 350 т;
- мінімальна кінцева температура напівпродукту 1620 °C;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 20$ °C.

Отримані дані розрахунків занесені в таблицю 2.

За результатами обчислювального експерименту з використанням програмного комплексу «EXCALIBUR» побудовані графічні залежності.

На графіку рис. 4 показано зміну вмісту вуглецю, кремнію і марганцю в залежності від фіксованої частки брукту в шихтових матеріалах на плавку. При збільшенні частки брукту та зниженню частки переробного чавуну вміст хімічних елементів-домішок

знижується, що спричиняє необхідність компенсації недостатнього фізичного тепла на плавку за рахунок збільшення приходу тепла екзотермічних реакцій окислення домішок рідкого чавуну і самого заліза в кінцевому напівпродукті.

Таблиця 2 – Вихідні дані і результати оптимізації киснево-конвертерної плавки

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами					
	а	б	в	г	д	е
Брухт А	62,89	67,386	71,936	76,549	81,23	85,968
Брухт чав.	5	5	5	5	5	5
Чавун пер.	308,595	305,577	302,574	299,645	296,783	293,913
Боксит	2	2	2	2	2	2
Вапно	10	10	10	10	10	10
Кисень	23,783	24,198	24,642	25,079	25,514	25,977
Брухт у ШМ %	15	16	17	18	19	20
Загальна маса ШМ, т	419,268	421,161	423,152	425,273	427,527	429,858
Вартість ШМ, у.о.	82492	82564	82651	82763	82902	83050
Склад металу, мас. %						
[C]	0,049	0,041	0,034	0,03	0,027	0,025
[Si]	0,012	0,008	0,006	0,005	0,004	0,003
[Mn]	0,117	0,095	0,077	0,063	0,053	0,045
[S]	0,04	0,041	0,041	0,041	0,04	0,04
[P]	0,009	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002
[O]	0,066	0,077	0,089	0,099	0,109	0,118
М мет. т	350,8	351	351,2	351,4	351,6	351,8
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)	14,52	17,84	21,44	24,99	28,45	31,94
(SiO ₂)	21,02	21,1	19,12	18,15	17,23	16,31
(MnO)	4,758	4,946	5,032	5,04	4,996	4,903
(S)	0,042	0,039	0,038	0,039	0,04	0,043
(P ₂ O ₅)	0,403	0,445	0,468	0,474	0,47	0,459
(Al ₂ O ₃)	4,743	4,538	4,323	4,116	3,918	3,72
(CaO)	44,18	42,21	40,18	38,23	36,38	34,53
(MgO)	10,35	9,892	9,421	8,969	8,537	8,105
Осн-ть шл.	2,7	2,67	2,67	2,68	2,69	2,695
М шлаку, т	29,4	30,89	32,28	33,93	35,66	37,57
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}	1,403	1,39	1,378	1,366	1,356	1,347
{CO ₂ }	0,093	0,106	0,119	0,13	0,14	0,149
М газу, т	31,4	31,34	31,26	31,17	31,03	30,9
V газу, тис.м ³	262,436	260,42	258,337	256,240	254,152	252,036
Т-ра, °С	1621	1621	1621	1622	1621	1620
Тепл. еф., ГДж	239,322	245,546	251,551	257,444	263,3	269,45

При збільшенні витрати кисню від 23 до 26 т вміст вуглецю в кінцевому напівпродукті знижується в 2 рази від 0,05 до 0,025%. Також збільшення витрати кисню призводить до зміни вмісту кремнію з 0,012 до 0,003%, а марганцю від 0,117 до 0,045%. Це пояснюється тим, що підвищена маса кисню на плавку викликає додаткове окислення вказаних домішок в кінцевому напівпродукті.

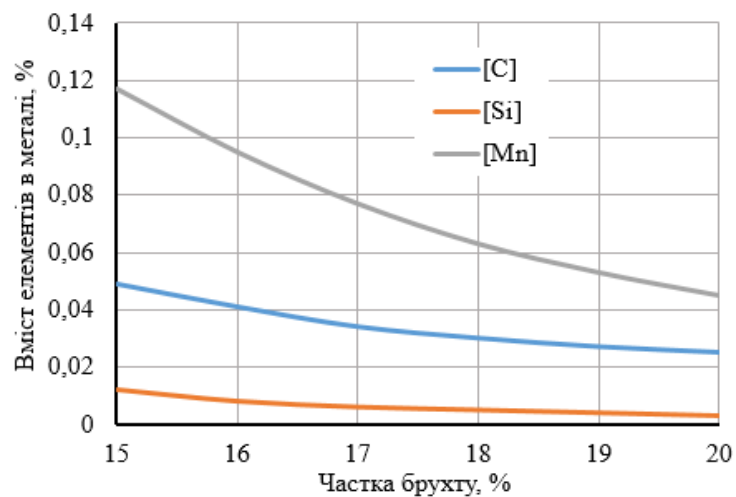


Рисунок 5 – Залежність вмісту вуглецю, кремнію і марганцю в кінцевому напівпродукті від фіксованої частки брухту на плавку

На графіку рис. 6а показано зміну вмісту вуглецю, кремнію і марганцю в залежності від оптимальної витрати кисню на плавку.

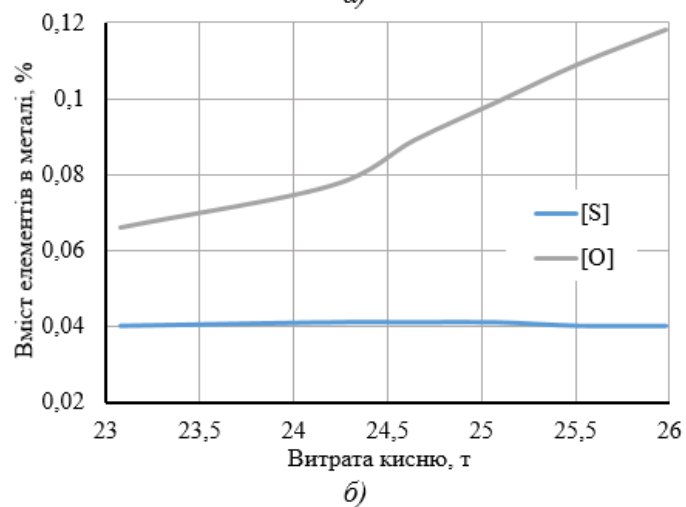
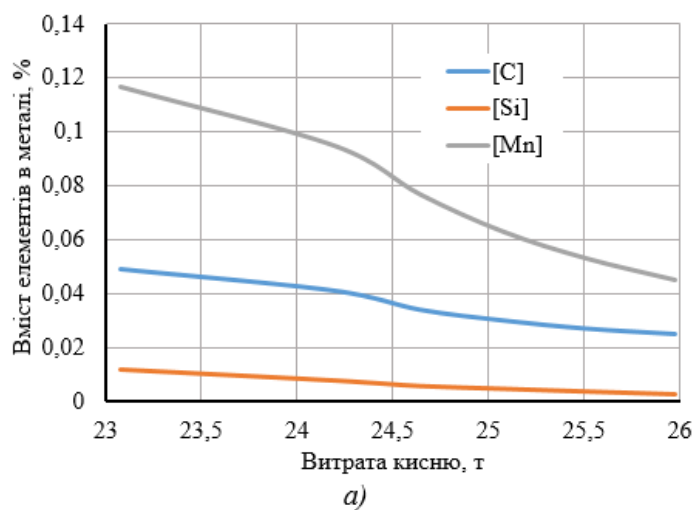


Рисунок 6 – Залежність вмісту вуглецю, кремнію і марганцю (а), сірки і кисню (б) в кінцевому напівпродукті від оптимальної витрати кисню на плавку

При збільшенні витрати кисню від 23 до 26 т відбувається збільшення вмісту кисню в кінцевому напівпродукті з 666 до 1180 ppm (рис. 6 б). Вміст сірки в сталі 0,04% практично не змінюється і залежить від її вмісту в чавуні.

Одночасно спостерігається зростання вмісту FeO в шлаку з 14 до 32% і зниження вмісту CaO з 44 до 34%, як свідчать дані на рис. 7.

Як показано на рис. 8, збільшення фіксованої частки брухту та відповідне зниження частки переробного чавуну призводить до збільшення маси шлаку з 29,4 до 37,5 т, що пов'язано зі збільшенням оптимальної витрати кисню з 23 до 26 т і окисненням значної частки хімічних елементів та заліза, які переходять з металевої до шлакової фази. Це підтверджується зміною вмісту FeO в шлаку з 14,5 до 31,9%. При цьому відносний вміст SiO₂ в шлаку знижується з 21 до 16,3%, також як і залишковий вміст кремнію в металі з 0,012 до 0,003%. Маса газу залишається приблизно на одному рівні 31 т.

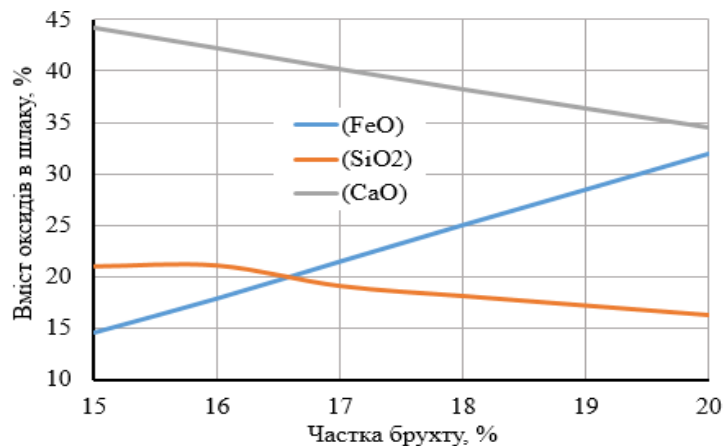


Рисунок 7 – Залежність вмісту оксидів заліза (FeO), кремнію (SiO₂) і кальцію (CaO) в шлаку від фіксованої частки брухту на плавку

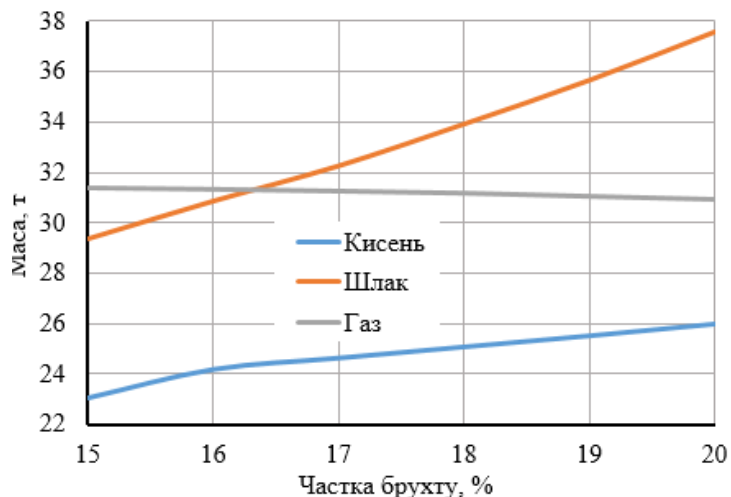


Рисунок 8 – Залежність оптимальної маси кисню, маси шлаку та газу від фіксованої частки брухту в шихті на плавку

На рис. 9 наведено зміну оптимальної маси шихтових матеріалів в залежності від фіксованої частки брухту в шихті на плавку.

Маса кінцевого напівпродукту підтримується на постійному рівні 350-352 т за рахунок оптимізації кількості шихтових матеріалів. При цьому маса брухту збільшується з 63 до 86 т, а маса переробного рідкого чавуну зменшується з 308 до 294 т.

Загальна маса шихтових матеріалів збільшується з 420 до 429 т за рахунок збільшення маси брухту і оптимальної витрати кисню на плавку з 23 до 26 т.

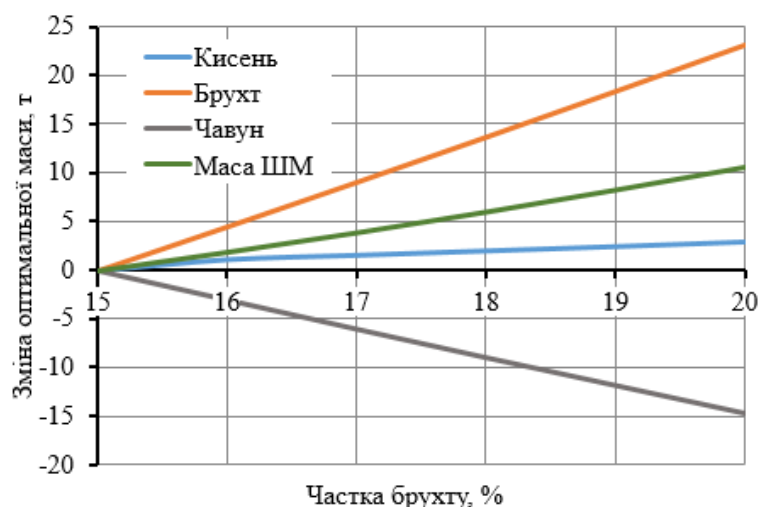


Рисунок 9 – Залежність зміни оптимальної маси шихтових матеріалів від частки брухту в шихті на плавку

Слід відзначити збільшення кількості шлаку з 29,4 до 37,6 т. Температура, як і маса, підтримується на заданому рівні 1620-1622 °С. Тепловий ефект екзотермічних реакцій у міру збільшення маси кисню на плавку збільшуються з 239 до 269 ГДж. У газовій фазі помітним є зниження відношення CO/CO_2 з 15,1 до 9, що відповідає зниженню вмісту вуглецю в кінцевому напівпродукті. При прийнятих співвідношеннях цін на основні шихтові матеріали вартість оптимального набору матеріалів на плавку поступово зростає з 82492 до 83050 у.о. Це дещо погіршує техніко-економічні показники плавки, оскільки при зниженні вмісту вуглецю і підвищенні вмісту кисню істотно зростає питома витрата легуючих матеріалів і розкислювачів для отримання більшості марок сталі.

Висновки.

1. Вирішена пряма та зворотна задачі термодинамічного аналізу системи «метал-шлак-газ» для оптимізації витрати брухту, кисню, чавуну та маси інших шихтових матеріалів киснево-конверторної плавки із застосуванням програми «EXCALIBUR». Проведення обчислювальних експериментів підтверджують адекватність термодинамічної моделі. Вони можуть бути використані для оптимізації дуттєвого режиму реальної конверторної плавки в складі системи автоматизованого управління технологічними процесами сталеплавильного виробництва.

2. Проаналізовано технологію киснево-конверторної плавки з підвищенням вмісту брухту і зниженням вмісту рідкого чавуну в шихтових матеріалах. Визначено вплив фізичних і хімічних показників шихтових матеріалів на параметри теплової роботи конвертерів, можливість часткової заміни чавуну в шихті металобрухтом з метою економії чавуну і підвищення техніко-економічних показників плавки.

3. Запропонована нова методика розрахунку оптимальних шихтових матеріалів відповідно до частки брухту в металошихті. Визначені параметри плавки: кінцева температура, хімічний склад металу і шлаку та маса напівпродукту. Визначені оптимальні маси шихтових матеріалів плавки при заданому кінцевому стані системи.

4. Технологію з підвищенням вмісту брухту і зниженням вмісту рідкого чавуну в шихтових матеріалах можна рекомендувати для виплавки низьковуглецевих марок. Для одержання високоякісної сталі з конверторного напівпродукту потрібно забезпечити позапічну обробку з глибоким розкисленням і десульфурою.

Бібліографічний перелік

1. Sinyakov R. V. The Efficient Control of the BOF Process Under Conditions of Permanent Changing of Technological Parameters. *Proc. The 4th European Steel Technology and Application Days (ESTAD-2019), 24-28 June 2019 – Congress Centre Düsseldorf, Germany*, P. 709.
2. Smirnov O. M., Kharchenko O. V. Differential assimilation coefficients (DAC) in computer steelmaking control systems. *Proc. The 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference, 6th CTISI Clean Technologies in the Steel Industry, October 17–21, 2022, Aachen, Germany*. <https://eosc-ctsi.com/program.html>.
3. Синяков Р. В., Харченко О. В. Програма «EXCALIBUR» – можливості та перспективи використання у металургійному виробництві. *Зб. наукових праць ДонНТУ. Серія: Металургія*. 2005. Вип 102. С. 82-91.
4. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп'ютерна програма «Excalibur». Свідectvo України про реєстрацію авторського права на твір № 111007 від 12.01.2022р.
5. Харченко О. В., Пономаренко О. Г., Корзун Є. Л. Термодинамічна модель багатоконпонентної конденсованої фази. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. № 8. С. 135-139.
6. Tao D. P. Prediction of the thermodynamic properties of multicomponent liquid alloys by binary infinite dilute activity coefficients. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001. Vol. 32. P. 1205-1211.
7. Харченко О. В. Термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу. *Метал та лиття України*. 2005. № 6. С. 13-17.
8. Храпко С. О. Кінетика взаємодії фаз у сталеплавильному агрегаті. *Матеріали XI Міжнародної конференції «Сучасні проблеми електрометалургії сталі»*. 2001. С. 35-37.
9. Харченко О. В. Диференціальні коефіцієнти засвоєння в комп'ютерних системах проектування і управління плавкою сталі. *Метал та лиття України*. 2021. Том 29. № 2. С. 23-30.
10. Синяков Р. В. Дослідження поведінки фосфору у кисневому конвертері з використанням програмного комплексу «DesigningMelt». *Метал та лиття України*. 2016. № 11-12. Том 282-283. С. 13-22.
11. Синяков Р. В., Харченко О. В. Автоматизоване проектування та керування киснево-конвертерною плавкою. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 3. С. 14-26.

References

1. Sinyakov R. V. The Efficient Control of the BOF Process Under Conditions of Permanent Changing of Technological Parameters. *Proc. The 4th European Steel Technology and Application Days (ESTAD-2019), 24-28 June 2019 – Congress Centre Düsseldorf, Germany*, P. 709.
2. Smirnov O. M., Kharchenko O. V. Differential assimilation coefficients (DAC) in computer steelmaking control systems. *Proc. The 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference, 6th CTISI Clean Technologies in the Steel Industry, October 17–21, 2022, Aachen, Germany*. <https://eosc-ctsi.com/program.html>.
3. Sinyakov R. V., Kharchenko O. V. The program "EXCALIBUR" – possibilities and prospects of application in metallurgical production. *Collection of scientific works of DonNTU. Series: Metallurgy*. 2005. Issue 102. P. 82-91.
4. Kharchenko O. V., Lichkonenko N. V. Computer program "Excalibur". Certificate of Ukraine on registration of copyright for the work No. 111007 dated 12.01.2022.
5. Kharchenko O. V., Ponomarenko O. G., Korzun E. L. Thermodynamic model of a multicomponent condensed phase. *Metallurgical and mining industry*. 2004. No. 8. P. 135-139.
6. Tao D. P. Prediction of the thermodynamic properties of multicomponent liquid alloys by binary infinite dilute activity coefficients. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001. Vol. 32. P. 1205-1211.
7. Kharchenko O. V. Thermodynamic modeling of the "metal-slag-gas" system taking into account the enthalpy heat balance. *Metal and casting of Ukraine*. 2005. No. 6. P. 13-17.
8. Khrapko S. O. Kinetics of phase interaction in a steelmaking unit. *Proceedings of the XI International Conference "Modern Problems of Steel Electrometallurgy"*. 2001. P. 35-37.
9. Kharchenko O. V. Differential assimilation coefficients in computer systems for designing and controlling steel melting. *Metal and Casting of Ukraine*. 2021. Vol. 29. No. 2. P. 23-30.
10. Sinyakov R. V. Investigation of the behavior of phosphorus in an oxygen converter using the software package "DesigningMelt". *Metal and Casting of Ukraine*. 2016. No. 11-12. Vol. 282-283. P. 13-22.
11. Sinyakov R. V., Kharchenko O. V. Automated design and control of oxygen-converter melting. *Metallurgical and mining industry*. 2018. No. 3. P. 14-26.

Kharchenko Oleksandr, candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3717-3872

Roman Volyar, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-7299-0053

Yurov Mykhailo, PhD candidate, Zaporizhzhia National University

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE SCRAP PORTION ON THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE OXYGEN-CONVERTER MELTING

The study investigates the influence of the proportion of scrap and other charge materials on the optimal parameters of oxygen-converter smelting based on a thermodynamic analysis of the “metal-slag-gas” system using the Gibbs chemical potential method. Utilizing the “Excalibur” software suite, experimental-computational modeling and systematic analysis were performed on a set of interrelated parameters of oxygen-converter smelting. These include pressure (including ferostatic metal pressure), pig iron temperature, temperature and chemical composition of the steelmaking bath in the converter, slag regime, initial mass of steel and pig iron scrap, refractory lining erosion, material preheating, oxygen mass for smelting, flux material mass, and a range of other technological and geometrical parameters of the oxygen converter.

Using the simplex method of linear programming, parameter optimization of the oxygen-converter smelting process was conducted for several scenarios. Graphical dependencies were developed showing the impact of material mass fractions—especially scrap—on the content of chemical elements in the final semi-product and slag. The technology of oxygen-converter smelting with increased scrap content and reduced molten pig iron in the charge materials was analyzed. The influence of the physical and chemical properties of charge materials on the thermal performance of converters was determined, along with the feasibility of partially replacing pig iron with scrap to save resources and enhance the technical and economic efficiency of smelting.

This modified technology, featuring a higher share of scrap and lower share of molten pig iron, is recommended for producing low-carbon steel grades. It is concluded that achieving high-quality steel from converter semi-products requires post-furnace treatment with thorough deoxidation and desulfurization. Additional conclusions were drawn regarding the practical application of the study’s findings.

Keywords: steel, oxygen-converter smelting, slag, charge materials, Gibbs method, chemical composition, optimization, system “metal-slag-gas”.