

Т.С. Голуб, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі, e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

Н.А. Арендач, аспірант відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі, e-mail: sheremetanatalia0116@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0073-2362>

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Термодинамічне дослідження процесів окислення домішок розплаву Fe-C за рахунок взаємодії з бульбашкою системи «нейтральний газ — кисень»

Сучасні тенденції вдосконалення процесів виробництва рідкої сталі мають за мету поєднання можливостей оцінювання та аналізу як за технологічними показниками, так і на основі аналітичних термодинамічних розрахунків. Серед термодинамічних показників особливо можна відзначити показник вільної енергії Гіббса, що дозволяє передбачити можливість протікання тих чи інших хімічних перетворень.

Сьогодення металургійної галузі для підтримання конкурентоздатності на ринку створює умови актуальності досліджень, спрямованих на інтенсифікацію фізико-хімічних перетворень в шлако-металевих системах, в тому числі на етапі позапічної обробки отриманого рідкого напівпродукту. Одним з методів інтенсифікації є підвищення ефективності масообміну в шлако-металевій ванні, що може бути досягнуто за рахунок введення додаткового перемішуючого газу (зокрема системи «кисень — аргон»). У роботі проведено оцінювання перспективного способу доведення сталі після випуску у ківш шляхом окислювальної продувки через днище сумішшю нейтрального газу та кисню з точки зору термодинамічного показника перебігу реакцій. Аналіз проведено на прикладі 250-т сталерозливного ковша за трьома можливими зонами перебігу реакцій: метал — газова бульбашка, метал — шлак, шлак — газова бульбашка, з урахуванням впливу для різних рівнів занурення у металеву ванну для урахування впливу зміни гідростатичного тиску на перебіг реакцій. Підтверджено, що збільшення гідростатичного тиску при зануренні у ванну сприяє перебігу реакцій, за результатами яких кількість газу, що утворюється, менша, ніж та, що бере участь у реакції. Встановлено, що при продуванні крізь днище сумішшю газів, яка містить кисень, зі збільшенням глибини ванни спостерігається активізація реакції розчинення газоподібного кисню у розплав; реакції, у яких бере участь газоподібний кисень, активізуються, підвищується можливість перебігу реакцій окислення фосфору, кремнію, марганцю та вуглецю з утворенням CO_2 .

Ключові слова: вільна енергія Гіббса; газова суміш кисень-аргон; продувка через днище; рідка сталь; сталь-ківш; хімічні реакції.

Вступ. Сучасні тенденції з розробки нових технологічних процесів чи вдосконалення вже існуючих в металургії передбачають інноваційні зв'язки між фізичними та хімічними явищами, які супроводжують операцію виробництва сталі. Якість та корисний ефект технічного рішення при цьому завжди виграє від застосування спеціальних методів досліджень, які можуть об'єднати кількісні міждисциплінарні прогнози цих сфер. Термодинамічна вільна енергія, яку зазвичай називають енергією Гіббса, є однією з таких міждисциплінарних концепцій. Особливо в макроскопічних системах, де теплові, електричні або механічні функції впливають на хімічні явища. Оцінка енергії Гіббса — це загальний метод, який слід застосовувати для взаємозв'язків між різними властивостями, який дає можливість оцінити та використовувати

рушійну силу хімічної системи до рівноваги в моделях процесу [1; 2]. На рисунку 1 показано об'ємний елемент безперервної реакційної системи, що взаємодіє з навколишнім середовищем. На систему впливають її теплові умови (температура і тиск), а також хімічні процеси, які відбуваються в об'ємному елементі. Крім того, для комплексної термохімічної обробки системи необхідно враховувати тепломасообмін через межі елемента об'єму.

Повний диференціал функції Гіббса має вигляд:

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_{k=1}^N \mu_k dn_k + \sum_i F_i dx_i, \quad (1)$$

де S позначає ентропію, а V — об'єм системи, μ_k — хімічний потенціал виду (k), T — температура, p — тиск, а n_k — молярна кількість хімічних речовин.

Останній термін (Fidxi) відноситься до додаткових узагальнених ефектів роботи.

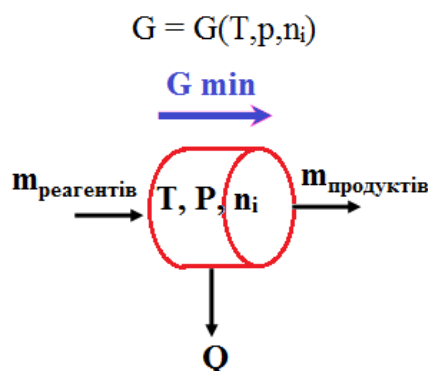


Рис. 1. Елемент безперервної реакційної системи, що взаємодіє з навколишнім середовищем

Мінімізація енергії Гіббса вимагає використання хімічних потенціалів μ_k (часткових молярних енергій Гіббса) складових системи.

У багатьох фізичних обставинах потенціали також обмежені іншими факторами, зазвичай пов'язаними з роботою. Тоді можна застосувати несуттєві обмеження для хімічних потенціалів разом із співвідношеннями балансу маси [1; 2]. Додаткові умови виникають із зазначеної роботи чи енергетичного ефекту або зумовлені кінетичними умовами реакції [3—6]. Рівняння, що керують хімічними потенціалами та їхніми відповідними обмеженнями в багатозфазній системі, можна вивести таким чином [3—6]:

$$\mu_k = \sum_{j=1}^I a_{kj} \pi_j; (k = 1, 2, \dots, N), \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^N a_{kj} n_k - \beta_j = 0; (j = 1, 2, \dots, I), \quad (3)$$

де N — кількість різних хімічних складових, утворених з I компонентів системи. π_j представляють хімічні потенціали компонентів у системі, а рівняння (3) окрім обмежень балансу маси включає необхідні несуттєві умови, такі як електронейтральність, збереження площі поверхні, метастабільність даної складової тощо.

Коли моделювання процесу виконується в термінах хімічних потенціалів складових системи (тобто в термінах мінімальної енергії Гіббса), очевидною перевагою методу є те, що результати розрахунку отримуються у вигляді властивості термохімічного стану, що у випадку оцінювання вільної енергії Гіббса вказує на можливість перебігу тих чи інших хімічних процесів. Таким чином, можна прослідкувати потенціал різних елементів чи речовин до взаємоперетворення з точки зору характеристик системи, таких як температура чи зміна тиску.

Постановка проблеми у загальному вигляді

В сучасних умовах інтенсифікація фізико-хімічних перетворень в шлако-металевих системах є актуальним напрямом досліджень. Одним з методів інтенсифікації є підвищення ефективності

масообміну в шлако-металевій ванні, що може бути досягнуто за рахунок введення додаткового перемішуючого газу (зокрема системи «кисень — аргон»). Таким чином, виходячи з результатів огляду сучасних технічних рішень щодо доведення сталі на етапі позапічної обробки, одним з перспективних методів рафінування сталі може бути процес продувки сумішшю технологічних газів, у тому числі у якості окислювальної продувки із додаванням до складу кисню [7—10].

Мета дослідження

З метою встановлення впливу суміші технологічних газів на шлако-металеву ванну проведено термодинамічний аналіз на прикладі 250-т сталерозливного ковша, який продувається сумішшю системи «кисень — аргон» через пористий продувний блок.

Результати дослідження

Схематичне зображення процесу взаємодії бульбашки, що містить суміш технологічних газів системи «кисень — аргон», з шлако-металевою ванною наведено на рисунку 2.

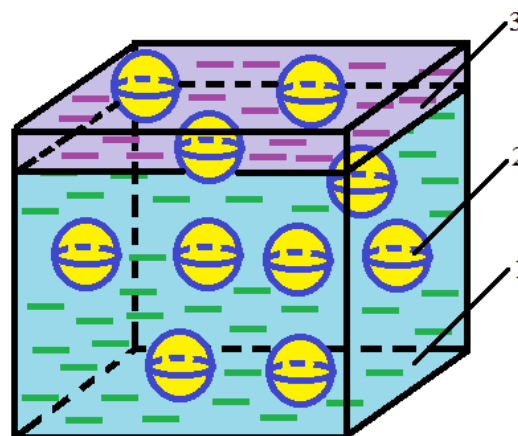


Рис. 2. Схематичне зображення елементарного об'єму шлако-металевої ванни, що взаємодіє з бульбашками, заповненими сумішшю технологічних газів, що включає кисень: 1 — металева фаза; 2 — бульбашки, заповнені сумішшю технологічних газів, що включає кисень; 3 — шлакова фаза

З позиції фізичної хімії та термодинамічного аналізу система, що розглядається, умовно може бути розділена на наступні ділянки: газова бульбашка — метал, газова бульбашка — шлак, метал — шлак. Для кожної ділянки характерне протікання хімічних реакцій.

Газова бульбашка — метал:

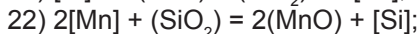
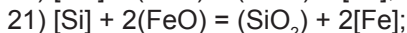
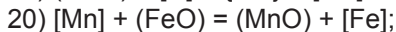
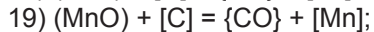
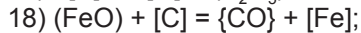
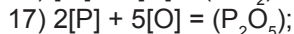
- 1) $1/2\{O_2\} = [O]^*$;
- 2) $1/2\{O_2\} [Fe] = (FeO)$;
- 3) $1/2\{O_2\} [Mn] = (MnO)$;
- 4) $\{O_2\} [Si] = (SiO_2)$;
- 5) $1/2\{O_2\} [C] = \{CO\}$;
- 6) $\{O_2\} [C] = \{CO_2\}$;
- 7) $\{O_2\} [S] = \{SO_2\}$;

*)у хімічних рівняннях 1) — 26) позначення: {E} — газова фаза, [E] — металева фаза, (E) — шлакова фаза

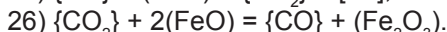
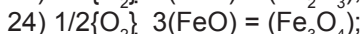
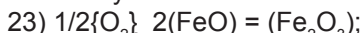
- 8) $5/2\{O_2\} 2[P] = (P_2O_5)$;
- 9) $1/2\{O_2\} \{CO\} = \{CO_2\}$;



Об'єм металевої ванни:



Газова бульбашка — шлак:



Бульбашка газу протягом підйому з днища металевої ванни до поверхні піддається різному впливу тиску середовища, зумовленому густиною, поверхневим натягом металу у ковші та висотою рідини, яка на бульбашку чинить вплив. Тому для наближення розрахункових умов протікання реакцій до реальних було використано рівняння [3—6]:

$$\Delta G_T = \Delta n \cdot R \cdot T \cdot \ln P - R \cdot T \cdot \ln K_p, \quad (4)$$

де Δn — різниця числа кіломолей газової суміші, що беруть участь у реакції, R — газова постійна, Дж/моль К; T — абсолютна температура, К; $\ln P$ — логарифм тиску, що впливає на систему; $\ln K_p$ — логарифм константи рівноваги.

Гідростатичний тиск, що впливає на реакційну систему, знайдемо з рівняння:

$$P = \rho \cdot g \cdot h, \quad (5)$$

де ρ — густина середовища (прийmemo для сталі 7000 кг/м³ і для шлаку 2500 кг/м³), g — гравітаційна постійна м/с²; h — глибина, на якій розглядається вплив тиску, м.

Для кожної з реакцій було розраховано константи рівноваги відповідно до наявних в літературі рівнянь залежності від температури для умов газоподібних та розчинених у металі речовин [3—6].

Промисловий 250-т сталерозливний ківш має наступні геометричні параметри робочого простору: висота — 4350 мм; діаметр верхньої частини — 4200 мм; діаметр донної частини — 3570 мм. (При цьому, для розрахунку впливу гідростатичного тиску необхідно врахувати, що для умов ефективного проведення позапічної обробки розплавів висота вільного борту повинна складати 500 мм, а товщина

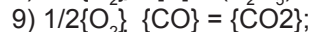
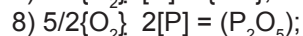
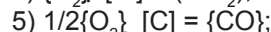
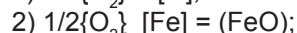
шару синтетичного шлаку — на рівні 300 мм).

Для оцінки впливу тиску середовища протягом періоду підйому газової бульбашки розрахунки були проведені для умов дна ковша, 25 %, 50 %, 75 % висоти ковша від днища та на межі розділу метал — шлак (відповідні зазначеним параметрам висоти значення гідростатичного тиску представлені в таблиці 1).

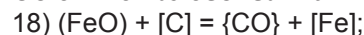
Обговорення результатів

Необхідно відмітити, що тиск впливає лише за умов участі газової фази в реакції та за умов різної кількості газів до та після реакції. Тобто для реакцій, що оцінювалися (наведені вище), тиск впливатиме на такі:

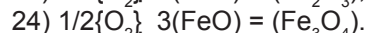
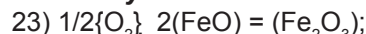
Газова бульбашка — метал:



Об'єм металевої ванни:



Газова бульбашка — шлак:



За умов підвищення тиску, що відбувається при заглибленні у ківш через значно вищу густину розплаву у порівнянні з газовою фазою, реакція буде намагатися «скомпенсувати» такий вплив шляхом зменшення об'єму газу в системі і її напрямок буде спрямований в той бік, де утворюється менше газу. Тобто під час впливу підвищеного тиску реакції (1), (2), (3), (4), (8), (9), (23) та (24) активніше проходитимуть в прямому напрямку з утворенням продуктів реакції й для них показник ΔG стає більш від'ємним. Реакції (5), (10), (12), (13), (18), (19) навпаки будуть проходити у зворотному напрямку й для них величина показника ΔG більше набуває позитивних чисел. І чим глибше занурення в ківш, тим сильніше буде такий вплив. Для можливості підтвердження зазначених припущень та оцінки такого впливу у таблиці 2 наведені результати розрахунків показника вільної енергії Гіббса для температури 1500 °С без урахування гідростатичного тиску для порівняння та з урахуванням тиску на різних глибинах ковша. Також показані відхилення розрахованих показників за висотою ковша від показників, отриманих з урахуванням гідростатичного тиску на поверхні ванни

Таблиця 1

Зміна гідростатичного тиску по висоті 250-т сталерозливного ковша

Висота шару металу й шлаку в ковші	Дно	25 % висоти розплаву	50 % висоти розплаву	75 % висоти розплаву	Межа розділу металевої та шлакової фази
Тиск, Па	251136,00	190225,71	129246,75	68336,46	7357,50

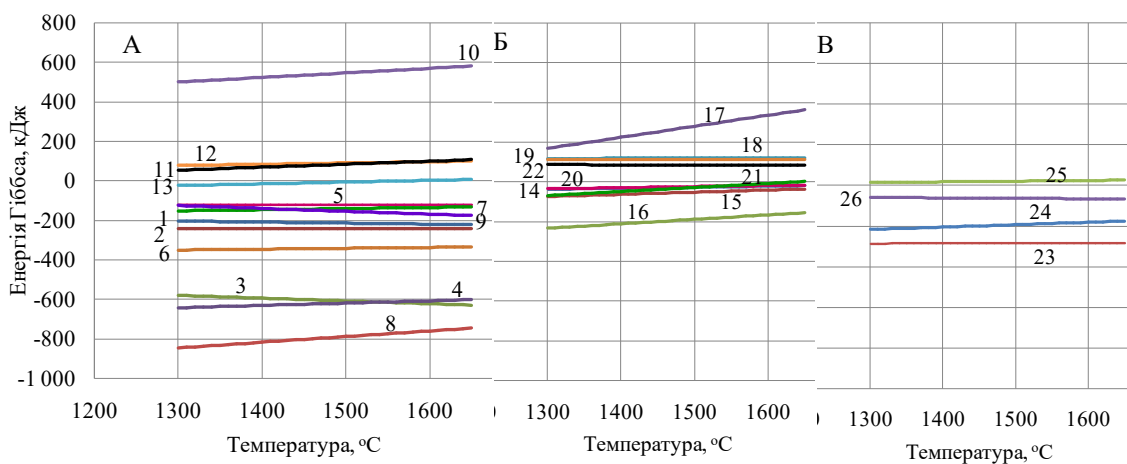


Рис. 3. Залежність енергії Гіббса від температури для ділянок: А — «газова бульбашка — метал»; Б — «об'єм металевої ванни»; В — «шлак — газова бульбашка» — рівень дна (номери реакцій відображені біля ліній)

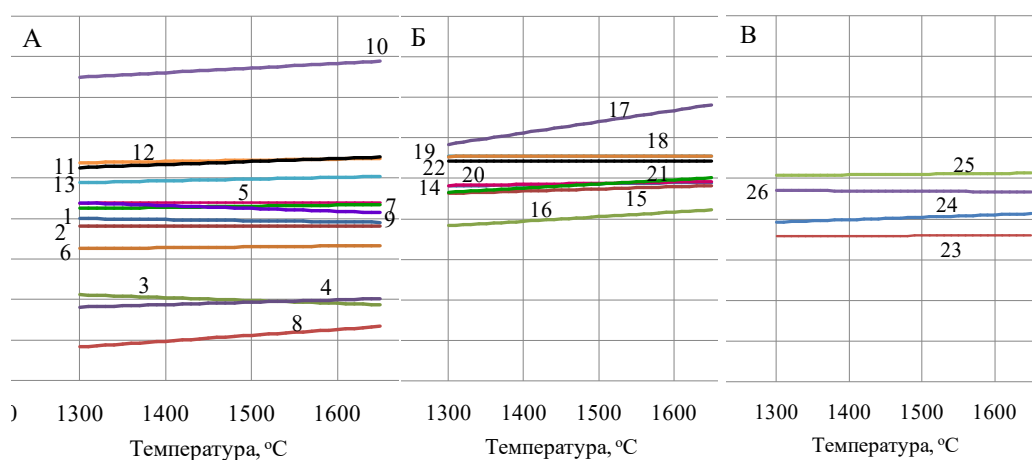


Рис. 4. Залежність енергії Гіббса від температури для ділянок: А — «газова бульбашка — метал»; Б — «об'єм металевої ванни»; В — «шлак — газова бульбашка» — рівень 25 % від днища (номери реакцій відображені біля ліній)

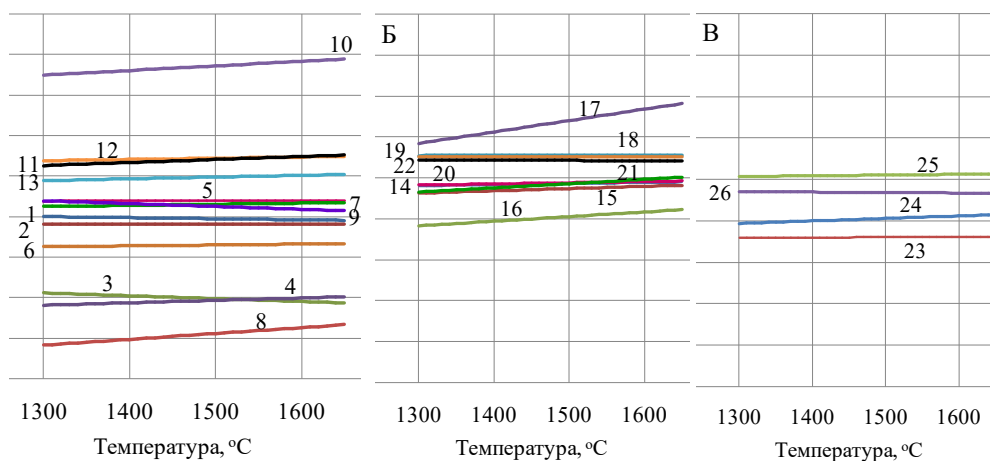


Рис. 5. Залежність енергії Гіббса від температури для ділянок: А — «газова бульбашка — метал»; Б — «об'єм металевої ванни»; В — «шлак — газова бульбашка» — рівень 50 % від днища (номери реакцій відображені біля ліній)

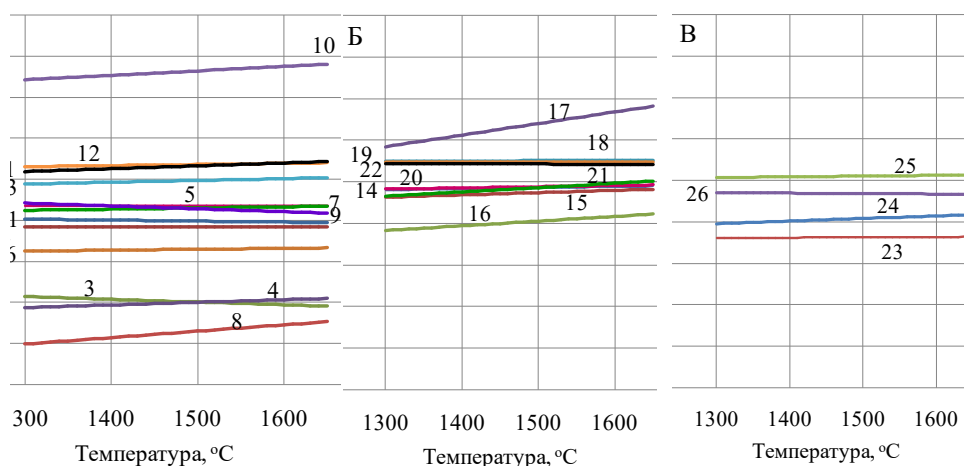


Рис. 6. Залежність енергії Гіббса від температури для ділянок: А — «газова бульбашка — метал»; Б — ділянки «об'єм металеві ванни»; В — «шлак — газова бульбашка» за умов врахування тиску стовпа металу та шлаку — рівень 75 % від днища (номери реакцій відображені біля ліній)

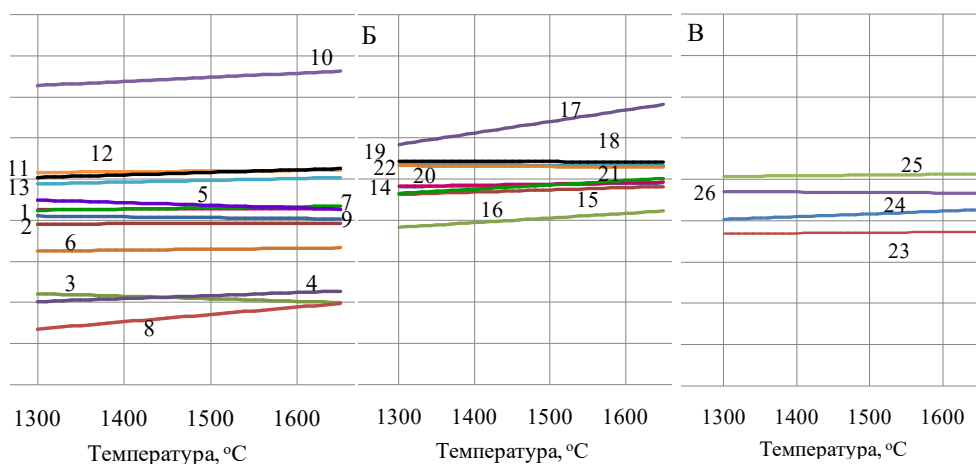


Рис. 7. Залежність енергії Гіббса від температури для ділянок: А — «газова бульбашка — метал»; Б — ділянки «об'єм металеві ванни»; В — «шлак — газова бульбашка» за умов врахування тиску стовпа металу та шлаку — рівень межі розділу метал — шлак (номери реакцій відображені біля ліній)

на межу розділу метал — шлак для тих реакцій, на які впливає тиск, та ті, що мають від'ємні значення енергії Гіббса (мінус біля відсотків значить зростання від'ємності показника у порівнянні з поверхнею ванни — підвищення вірогідності протікання реакції).

Відповідно до представлених результатів розрахунків можна зробити висновок, що за умов врахування гідростатичного тиску такі реакції, як (12), (13) та (19) втрачають термодинамічну можливість протікання для всіх проаналізованих глибин розплаву (величина вільної енергії Гіббса з негативною стає позитивною).

Для реакцій (9), (8), (24), (1), (2), (23), (4), (3) (розташовані у порядку зниження приросту від'ємності показника у порівнянні із розрахунком без урахування гідростатичного тиску) відмічено за результатами розрахунку значне покращення можливості протікання реакцій. Також мають від'ємні значення енергії Гіббса (на рівні не менше 100 кДж), а значить умови для перебігу реакцій у порядку зменшення від'ємності (6), (16), (7), (6), (5).

Щодо зміни впливу гідростатичного тиску на

перебіг реакцій при заглибленні у ківш можна відзначити, що, відповідно до розрахунків, найбільше це відбивається на реакціях (8) та (9) зі зростанням вірогідності перебігу реакції до 20 % при заглибленні у ванну. Також підвищення можливості протікання реакцій при заглибленні у ківш можна очікувати для реакцій (1), (2), (3), (4), (23) та (24) з підвищенням від'ємності значень енергії Гіббса від 3—6 % до 10—15 % в середньому.

Тобто при подачі кисню через днище у суміші з іншими газами підвищується активність реакцій розчинення газоподібного кисню в металевій ванні та взаємодія газоподібного кисню з домішками розплаву: фосфором, кремнієм, марганцем, окислення вуглецю до CO_2 та доокислення бульбашок CO до CO_2 . Слід також відмітити реакцію (5) — окислення вуглецю: за умов врахування гідростатичного тиску розрахункова вільна енергія Гіббса для цієї реакції все ж залишається від'ємною, хоча її величина на межі розділу метал — шлак стає приблизно на 30 % менша. Заглиблення углиб ванни також не покращує умов перебігу цієї реакції, тобто окислення вуглецю

Показник вільної енергії Гіббса (dG) для оцінюваних реакцій за температури 1500 °C при урахуванні впливу тиску на різних глибинах ковша

Номер реакції	dG за різних умов впливу тиску (зміна можливості протікання реакцій, %)					
	Без урахування тиску	Дно ковша	25 % від дна	50 % від дна	75 % від дна	Межа розділу метал — шлак
1	-122,23	-213,87 (-13,85)	-211,83 (-12,76)	-208,98 (-11,24)	-204,28 (-8,74)	-187,85
2	-150,42	-242,06 (-12,07)	-240,02 (-11,10)	-237,17 (-9,78)	-232,47 (-7,60)	-216,05
3	-516,21	-607,85 (-4,47)	-605,80 (-4,12)	-602,95 (-3,63)	-598,26 (-2,82)	-581,83
4	-435,36	-618,64 (-9,18)	-614,54 (-8,46)	-608,85 (-7,46)	-599,45 (-5,80)	-566,60
5	-212,34	-120,70	-122,75	-125,60	-130,29	-146,72
6	-341,14	-341,14	-341,14	-341,14	-341,14	-341,14
7	-140,27	-140,27	-140,27	-140,27	-140,27	-140,27
8	-329,95	-788,16 (-19,77)	-777,92 (-18,21)	-763,68 (-16,05)	-740,20 (-12,48)	-658,06
9	-62,10	-153,74 (-20,37)	-151,70 (-18,77)	-148,85 (-16,54)	-144,15 (-12,86)	-127,72
10	362,86	546,14	542,04	536,35	526,95	494,10
11	-6,27	-6,27	-6,27	-6,27	-6,27	-6,27
12	-92,62	90,66	86,57	80,87	71,48	38,62
13	-98,89	84,39	80,30	74,60	65,20	32,35
14	-28,33	-28,33	-28,33	-28,33	-28,33	-28,33
15	-51,48	-51,48	-51,48	-51,48	-51,48	-51,48
16	-188,60	-188,60	-188,60	-188,60	-188,60	-188,60
17	281,20	281,20	281,20	281,20	281,20	281,20
18	-62,10	121,18	111,39	111,39	101,99	69,14
19	-69,46	113,82	109,73	104,03	94,63	61,78
20	-23,16	-23,16	-23,16	-23,16	-23,16	-23,16
21	-26,92	-26,92	-26,92	-26,92	-26,92	-26,92
22	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97
23	-192,35	-284,00 (-10,09)	-281,95 (-9,29)	-279,10 (-8,19)	-274,40 (-6,37)	-257,98
24	-101,47	-193,11 (-15,57)	-191,07 (-14,35)	-188,22 (-12,64)	-183,52 (-9,83)	-167,09
25	21,37	21,37	21,37	21,37	21,37	21,37
26	-63,18	-63,18	-63,18	-63,18	-63,18	-63,18

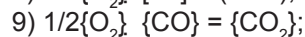
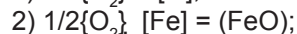
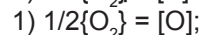
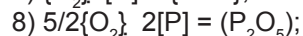
газоподібним киснем краще відбувається ближче до поверхні ванни. Щодо реакцій (12) та (13) — окислення вуглецю розчиненим киснем, то відповідно до розрахунків гідростатичний тиск на них відбивається погано. Проте відомо, що на глибині активнішою стає реакція розчинення газоподібного кисню у металі, тобто у цих реакціях буде активне постачання реагенту — розчиненого кисню. Крім того встановлено за розрахунками активізацію реакції до окислення CO до CO₂ газоподібним киснем. У підсумку це значить, що можливість перебігу реакцій окислення розчиненого вуглецю киснем буде залежати вже не тільки від гідростатичного тиску, а й від концентраційних умов реагентів та продукту реакції.

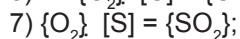
Висновки

З наведених результатів термодинамічного аналізу за вільною енергією Гіббса реакцій, що мо-

жуть відбуватися під час продувки сталі у ковші крізь донний продувний блок газовою сумішшю «кисень — аргон» за трьома узагальненими ділянками ванни в системі газова бульбашка — металевий розплав — шлак, можна зробити наступні висновки:

1. Достатні для перебігу можливих реакцій у розплавленому об'ємі сталі при продуванні газоподібним киснем умови складаються у зоні «газова бульбашка — метал» для реакцій (розташовані відповідно до зниження можливості протікання):

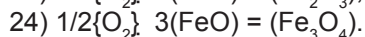
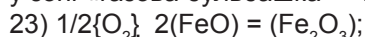




у зоні «об'єм металевої ванни»:

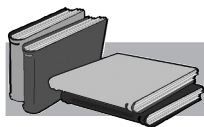
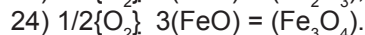
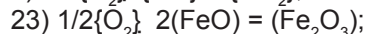
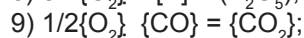
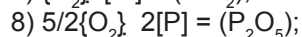
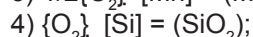
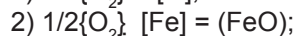


у зоні «газова бульбашка — шлак»:



2. При продувці розплав сталі через днище газовою сумішшю, що містить у своєму складі кисень, завдяки впливу гідростатичного тиску розплав

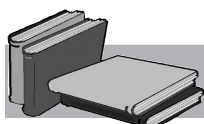
активніше протікатимуть реакції окислення за участю газоподібного кисню:



ЛІТЕРАТУРА

1. Koukkari P., Pajarre R., Hack K. Constrained Gibbs energy minimisation. *International Journal of Materials Research*. 2007. Vol. 98. Iss. 10. P. 926—934. <https://doi.org/10.3139/146.101550>
2. Koukkari P., Penttilä K., Keegel M. Coupled thermodynamic and kinetic models for high-temperature processes. In High temperature materials chemistry: proceedings of the 10th international IUPAC conference held from 10 to 14 April 2000 at the Forschungszentrum Jülich, Germany. Part II, 2000. P. 253—256.
3. Lele A. B., Dutta S. K. *Metallurgical Thermodynamics Kinetics and Numericals*. S Chand Publishing, 2012. 200 p.
4. Upadhyaya G. S., Dube R. K. *Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics: International Series on Materials Science and Technology*. Pergamon, 1977. 270 p.
5. Shamsuddin M. *Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. John Wiley & Sons, Inc. 2016.
6. Rao Y. K. *Stoichiometry and Thermodynamics of Metallurgical Processes*. 2 Volume. Cambridge University Press, 2009. 1013 p.
7. Tupkary R. H., Tupkary V. R. *Modern Steel Making Handbook*. Mercury Learning and Information. 2018. 657 p.
8. Мельник С. Г. Производство стали улучшенного качества с применением внепечной обработки. *Вестник ПГТУ*. 1999. № 7. С. 155—164.
9. Molchanov L., Arendach N., Synehin Y. Study of the Designs of Bottom Blowing Devices for Oxidative Blowing in Teeming Ladles. *Modern Problems of Metallurgy*. 2021. vol. 24. P. 81—89. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.08>
10. Молчанов Л. С., Шеремета Н. А., Синегін Є. В. Дослідження ефективності гомогенізації рідкої сталі при продувці через блоки різної конструкції. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 76—80. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.10>

Надійшла 30.09.2024



REFERENCES

1. Koukkari, P., Pajarre, R., & Hack, K. (2007). Constrained Gibbs energy minimisation. *International Journal of Materials Research*, 98(10), 926-934. <https://doi.org/10.3139/146.101550>
2. Koukkari, P., Penttilä, K., & Keegel, M. (2000). Coupled Thermodynamic and Kinetic Models for High-Temperature Processes. Coupled thermodynamic and kinetic models for high-temperature processes. In High temperature materials chemistry: proceedings of the 10th international IUPAC conference held from 10 to 14 April 2000 at the Forschungszentrum Jülich, Germany. Part II, (pp. 253-256).
3. Lele, A. B., & Dutta, S. K. (2012). *Metallurgical Thermodynamics Kinetics and Numericals*. S Chand Publishing.
4. Upadhyaya, G. S., & Dube, R. K. (1977). *Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics: International Series on Materials Science and Technology*. Pergamon.
5. Shamsuddin, M. (2016). *Physical Chemistry of Metallurgical Processes*. John Wiley & Sons, Inc.
6. Rao, Y. K. (2009). *Stoichiometry and Thermodynamics of Metallurgical Processes*. 2 Volume. Cambridge University Press.
7. Tupkary, R. H., & Tupkary, V. R. (2018). *Modern Steel Making Handbook*. Mercury Learning & Information.
8. Melnik, S. G. (1999). Proizvodstvo stali uluchshenogo kachestva s primeneniem vnepechnoj obrabotki [Steel production of better quality with out-of-furnace treatment]. *Vestnik PSTU*, 7, 155-164 [in Russian].
9. Molchanov, L., Arendach, N., & Synehin, Y. (2021). Study of the Designs of Bottom Blowing Devices for Oxidative Blowing in Teeming Ladles. *Modern Problems of Metallurgy*, 24, 81-89. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.08>

10. Molchanov, L. S., Sheremeta, N. A., & Synehin, Y. V. (2018). Study of efficiency of liquid steel homogenization with blowing through blocks of various designs. *Theory and Practice of Metallurgy*, 6, 76-80. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.10> [in Ukrainian].

Received 30.09.2024

Summary

T.S. Holub, PhD (Engin.), Senior Researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy,
e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>
N.A. Arendach, PhD student of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, e-mail: sheremetanatalia0116@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-0073-2362>

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Thermodynamic Study of the Processes of Oxidation of Fe-C Melt Impurities due to Interaction with the Bubble of the “Neutral Gas – Oxygen” System

Modern trends in the improvement of liquid steel production processes are aimed at combining the possibilities of assessment and analysis both by technological indicators and on the basis of analytical thermodynamic calculations. Among the thermodynamic indicators, the Gibbs free energy indicator is especially noted, that allows predicting the possibility of certain chemical transformations occurring.

The present state of the metallurgical industry in order to maintain competitiveness on the market creates the conditions for the relevance of research aimed at the intensification of physico-chemical transformations in slag-metal systems, including at the stage of out of furnace processing of the obtained liquid semi-product. One of the methods of intensification is to increase the mass transfer efficiency in the slag-metal bath. This might be achieved by introducing an additional stirring gas (in particular, the “oxygen-argon” system). In the work, an evaluation of a promising method of steel treatment after tapping into the ladle by means of oxidizing purging through the bottom with a mixture of neutral gas and oxygen was carried out from the point of view of the thermodynamic index of the course of reactions. The analysis was carried out on the example of a 250-ton steel ladle for three possible reaction zones: metal – gas bubble, metal – slag, slag – gas bubble, taking into account the effect of different levels of immersion in a metal bath to account the effect of changing hydrostatic pressure on the course of reactions. It has been confirmed that the increase in hydrostatic pressure during immersion in the bath contributes to the course of reactions, as a result of which the amount of gas produced is less than that involved in the reaction. It was established that when blowing through the bottom with a mixture of gases containing oxygen, with an increase in the depth of the bath, an activation of the reaction of dissolving gaseous oxygen in the melt is observed; reactions in which gaseous oxygen takes part become more active, the possibility of oxidation reactions of phosphorus, silicon, manganese and carbon with the formation of CO₂ increases.

Keywords

Chemical reactions; Gibbs free energy; liquid steel; oxygen-argon gas mixture; purging through the bottom; steel ladle.