

DOI: 10.31319/2519-2884.45.2024.2

УДК 669.184

Молчанов Л.С., к.т.н., заввідділом, ORCID: 0000-0001-6139-5956,
e-mail: metall729321@gmail.com

Голуб Т.С., к.т.н., с.н.с., ORCID: 0000-0001-9269-2953, e-mail: isinasu.golubts@gmail.com

Арендач Н.А., здобувач третього (доктор філософії) рівня, ORCID: 0000-0002-0073-2362,
e-mail: sheremetanatalia0116@gmail.com

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Molchanov Lavr, PhD, the head of the department of Physical and technical problems
of steel metallurgy

Golub Tetiana, PhD, senior researcher

Arendach Natalia, postgraduate student

Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dnipro

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПЕРЕБІГУ ОКИСНЕННЯ ВУГЛЕЦЮ В СТАЛЬКОВШІ ПРИ ДОННОМУ БУЛЬБАШКОВОМУ ПРОДУВАННІ СУМІШЮ ГАЗІВ СИСТЕМИ «КИСЕНЬ — НЕЙТРАЛЬНИЙ ГАЗ»

У роботі представлені результати дослідження особливостей окиснювального процесу у сталь-ковші за умов донної подачі суміші газів «кисень — нейтральний газ» через пористий блок. Встановлено, що за показником вільної енергії Гіббса з урахуванням особливостей перебігу процесу найбільшу пріоритетність отримують реакції окиснення вуглецю за участю газо-подібного кисню. За результатами низькотемпературного моделювання відмічено, що для проведення ефективного окиснення вуглецю необхідно збільшити частку ванни, що охоплюється бульбашками продувочного газу, і час їх перебування у ванні, які відповідають інтенсивності донної продувки фізичної моделі близько $1 \text{ м}^3/\text{т год}$.

Ключові слова: позапічна обробка сталі; донна продувка; газова суміш кисень — інертний газ; вільна енергія Гіббса; фізичне моделювання.

The paper presents the results of the study of the peculiarities of the oxidation process in a steel ladle under the conditions of the bottom supply of a mixture of gases “oxygen — neutral gas” through a porous block. It was established that according to the Gibbs free energy index, taking into account the peculiarities of the course of the process, carbon oxidation reactions with the participation of gaseous oxygen receive the highest priority. According to the results of low-temperature modeling, it was noted that for effective carbon oxidation, it is necessary to increase the proportion of the bath covered by bubbles of purge gas and the time they stay in the bath, that correspond to the intensity of bottom purging of the physical model of about $1 \text{ m}^3/\text{t h}$.

Keywords: out-of-furnace treatment of steel; bottom purging; oxygen-inert gas mixture; Gibbs free energy; physical modeling.

Постановка проблеми

Виробництво якісних за вмістом домішок сталей тісно пов'язано з використанням агрегатів позапічної обробки через економічну доцільність: використання плавильного агрегату для високошвидкісної виплавки напівпродукту та регулювання кінцевого хімічного складу і температури сталі після випуску у ковші [1—5]. Крім цього, певні металургійні реакції, з міркувань конструкції та експлуатації обладнання, більш ефективно проводяться за межами плавильного агрегату.

Обробка металу продувкою в ковші спрямована на розчинення та рівномірне розосередження модифікувальних присадок. Проте можливо організувати в ковші протікання реакції окиснення домішок, у тому числі вуглецю, що сприятиме скороченню часу процесу конверту-

вання та зниженню загальних втрат заліза зі шлаком, що вказує на актуальність проведення досліджень у цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Метал в ковші має невеликий вміст вуглецю. Відомо, що при досягненні концентрації вуглецю в металі 0,2—0,3 % і особливо при зниженні до рівня менше 0,1 % процес окислення значно залежить від швидкості доставки кисню до металу. При цьому кисень, що надходить у ванну може витрачатися на збільшення вмісту оксидів заліза в шлаку і збільшення концентрації кисню в металі. В області концентрації вуглецю, що дорівнює 0,11—0,13 %, витрати кисню на окислення вуглецю та окислення заліза стають рівними приблизно 0,5—0,6 м³/т металу [6—7]. Вказану концентрацію вуглецю також можна віднести до критичного розряду, оскільки при такому його вмісті витрата кисню, що йде на окиснення заліза досягає значень витрати кисню на окиснення вуглецю. При подальшому зниженні концентрації вуглецю в розплаві витрата кисню на окиснення заліза починає різко зростати і значно перевищує цей показник для окиснення вуглецю. При концентрації вуглецю менше 0,1 % цей показник досягає десятикратної величини (до 3,3—9 м³/т металу). Зазначена концентрація вуглецю в металевому розплаві одержала назву другої критичної. В зазначеному випадку окиснення вуглецю вже лімітується не дифузією кисню, а дифузією вуглецю. Область концентрацій вуглецю від 0,1 % до 0,2—0,3 % є проміжною або перехідною, тому що в цій області окиснення вуглецю визначається як дифузією кисню, так і вуглецю. Таким чином, важливим показником стає як інтенсивність масопереносу, так і дифузія необхідного компоненту, що також залежить від масопереносу через прикордонний шар на міжфазному кордоні між металом і газовою фазою [8—10].

При продуванні рідкої металеві ванни бульбашками з газовою сумішшю кисень-аргон на поверхні цих бульбашок, що зустрічаються з рідким металом, відбуваються хімічні реакції: основний компонент розплаву – залізо, а також наявний у розплаві марганець перетворюються під дією кисню на окисли, що можуть покривати бульбашку оксидною плівкою; вміст карбону невеликий, бульбашці потрібно дістатися до нього, проте при «зустрічі» з карбоном відбувається окиснення останнього як оксидною плівкою на поверхні бульбашки, так і газоподібним киснем з утворенням CO, яке або виділяється у самостійну фазу — бульбашку CO, або може поглинатися бульбашкою продувної суміші бо ,відносно CO, є «вакуумом». Крім того, окиснення вище вказаних компонентів може відбуватися розчиненим у металевому розплаві киснем (рис. 1).

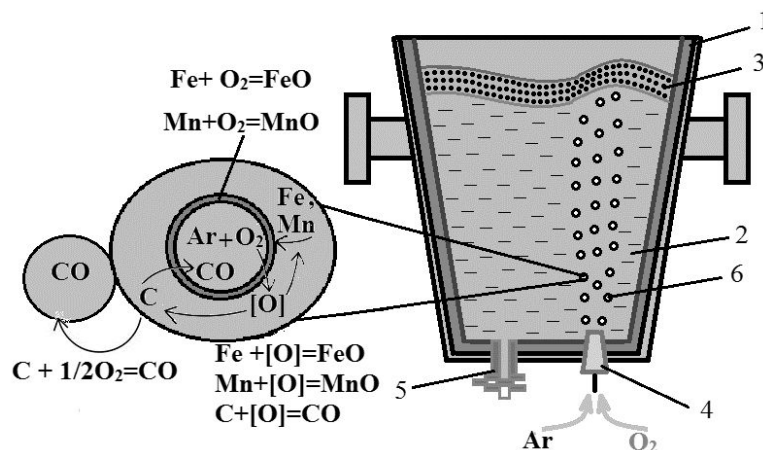


Рис. 1. Схематичне зображення технологічної операції з рафінування сталі у ковші сумішшю технологічних газів, що включає кисень на етапі позапічної обробки: 1 — ківш; 2 — рідка сталь; 3 — шлаковий розплав; 4 — продувний донний блок; 5 — шибєрний затвор для випуску металу; 6 — бульбашки, заповнені сумішшю технологічних газів, що включає кисень

Відповідно активність протікання вказаних процесів окиснення буде інтенсивніша тоді, коли площа поверхні бульбашок та їх кількість буде найбільша, час їх перебування у металі

буде довшим та рух активнішим і складнішим. Площа поверхні бульбашки тим більша, чим менший її розмір. Тобто продувку треба здійснювати через досить дрібні пори для створення різноспрямованих бульбашок, кількість яких повинна бути великою для створення великої кількості бульбашок. Рух та час перебування бульбашок у об'ємі металу залежить від характеру продувки.

Формулювання мети дослідження

У роботі за мету було поставлено дослідження особливостей окиснення домішок при донному продуванні залізовуглецевого розплаву та інтенсивності масопереносу при різних режимах продування ковшевої ванни через донний продувний блок.

Виклад основного матеріалу

Авторами для проведення обробки металевого розплаву в ковші сумішшю газів «кисень — нейтральний газ» було обрано продувний пристрій з ненаправленою пористістю, що формує дрібні бульбашки газу.

На першому етапі досліджень було проведено розрахунковий аналіз можливості протікання реакцій окиснення вуглецю киснем при продуванні через пористий донний блок за умов подачі газу через днище. За показник для оцінки вірогідності протікання хімічної реакції було обрано вільну енергію Гіббса, яку розраховували за умов гідростатичного впливу висоти металевої ванни [11—14]:

$$\Delta G_T = \Delta n \cdot R \cdot T \cdot \ln P - R \cdot T \cdot \ln K_p, \quad (1)$$

де Δn — різниця числа кіломолей речовин, що беруть участь у реакції та знаходяться у газовій фазі; R — газова стала, Дж/моль К; T — абсолютна температура, К (аналіз було проведено для діапазону температур 1575 — 1873К); $\ln P$ — логарифм тиску, що впливає на систему; $\ln K_p$ — логарифм константи рівноваги, розрахунок якої проводився за наявними в літературі даними залежності від температури.

Гідростатичний тиск металевої ванни обчислювався за допомогою рівняння:

$$P = \rho \cdot g \cdot h, \quad (2)$$

де ρ — густина середовища (прийmemo для сталі 7000 кг/м³ і для шлаку 3500 кг/м³); g — гравітаційна стала м/с²; h — глибина, на якій розглядається вплив тиску, м.

Бульбашки газової фази повільно підіймаються і на всьому протязі руху можуть протікати фізико-хімічні реакції, тому для аналізу були обрані декілька рівнів глибини ковша: дно — максимальна глибина, 75 % глибини, 50 % глибини, 25 % глибини та межа розділу металеве — шлакова фази. Аналіз проведено для моделі промислового 250-т сталерозливного ковша з наступними параметрами: висота — 4350 мм; діаметр верхньої частини — 4200 мм; діаметр донної частини — 3570 мм; висота вільного борту 500 мм; товщина шару синтетичного шлаку 300 мм.

У ході проведення дослідження під час продувки в ковші були проаналізовані наступні реакції за участю вуглецю та кисню, який може бути у газоподібному, розчиненому стані (ця реакція також включена до переліку) та у вигляді оксидів заліза чи марганцю:

- 1) $[C] + 1/2\{O_2\} = \{CO\}$;
- 2) $[C] + \{O_2\} = \{CO_2\}$;
- 3) $[C] + [O] = \{CO\}$;
- 4) $[C] + [O] = \{CO_2\}$;
- 5) $[C] + \{CO_2\} = 2\{CO\}$;
- 6) $1/2\{O_2\} + \{CO\} = \{CO_2\}$;
- 7) $[O] + \{CO\} = \{CO_2\}$;
- 8) $[C] + (FeO) = \{CO\} + [Fe]$;
- 9) $[C] + (MnO) = \{CO\} + [Mn]$;
- 10) $1/2\{O_2\} = [O]$.

Гідростатичний тиск шару металевого розплаву створюватиме підвищений тиск у бульбашках на глибині, який буде зростатиме при наближенні до дна ковша. Збільшення тиску змушує реакції за участі речовин у газовій фазі спрямовуватися у бік зменшення об'єму газів. Проте не на всі реакції, що вказані вище, впливатиме тиск. У зв'язку з рівністю кількості газоподібних складових у вихідних речовинах та у продуктах реакції до та після протікання хімічного перетворення тиск не впливатиме на реакції (2) та (7).

На рис. 2 наведено результати розрахунку величини вільної енергії Гіббса як показника можливості перебігу проаналізованих реакцій при температурі 1773 К для різних рівнів металу у ковші. Відповідно до них можна зробити висновок, що за розглянутих умов вільно відбуватися можуть реакції (1), (2) — окиснення вуглецю газоподібним киснем, (6) — доокиснення утвореного CO до CO₂, та (10) — розчинення кисню у металевому розплаві.

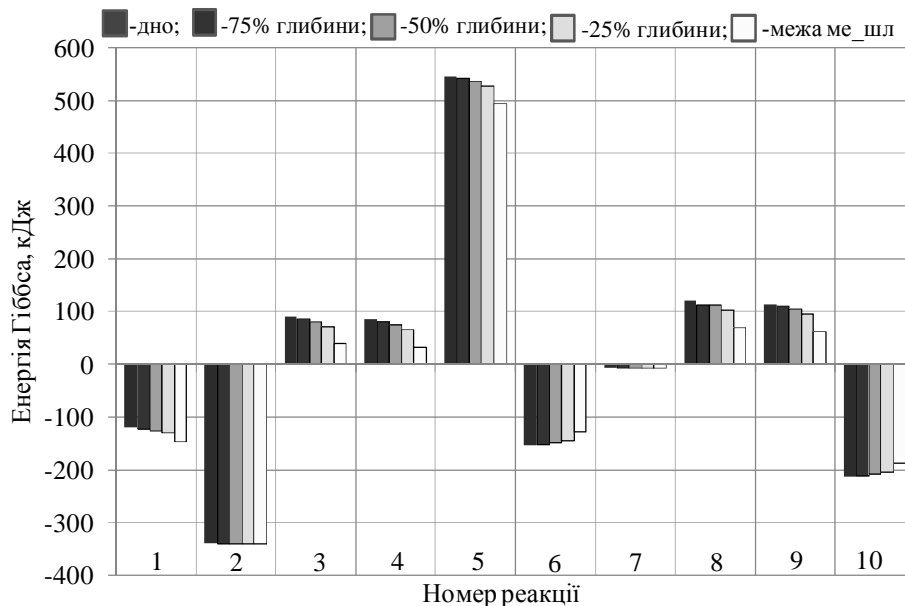


Рис. 2. Співставлення величини вільної енергії Гіббса для проаналізованих реакцій при температурі 1773 К при зміні висоти шару шлакової і металевій фаз в ковші від дна до межі розділу метал — шлак (ме_шл)

Реакція (7) за участі розчиненого кисню має досить невеликий, хоча й від'ємний, показник вільної енергії Гіббса. Інші реакції, у тому числі з участю оксидів металів, за даних умов не зможуть вільно відбуватися. Зменшення впливу гідростатичного тиску при підйомі від дна сталерозливного ковша до межі розділу метал — шлак не значно впливає на вказані реакції. Однак слід відмітити, що реакції (6) та (10) активніше можуть відбуватися на дні ковша, де тиск вище, а реакція (1) — ближче до поверхні ванни. Проте і при наближенні до дна ковша реакція (1) має можливість перебігу відповідно до достатніх величин від'ємної енергії Гіббса цієї реакції. Також слід відзначити, що серед проаналізованих реакцій найбільшого розвитку може набувати реакція (2) — окиснення вуглецю до CO₂, бо для неї відмічено найнижчі показники розрахованої енергії Гіббса. Тобто за заданих умов для здійснення процесу окиснення вуглецю необхідною умовою є зустріч газоподібного кисню та розчиненого в металевому розплаві вуглецю, який є досить розосередженим, бо вміст його в напівпродукті невеликий.

Наступний крок дослідження передбачав проведення уточнення особливостей перемішування при використанні одного донного продувального блоку з мілко-дрібною (діаметр пор 0,1 мм, діаметр вставки 12 мм) ненаправленою пористістю на створеній 15 л фізичній моделі 250-т ковша у масштабі 1:15 із використанням у якості модельної рідини води. Модель була створена з урахуванням критеріїв подоби Фруда модифікованого та гомохронності [15, 16]. Для оцінювання особливостей перемішування розплаву у ковші було проведено відеозйомку з паралельною фіксацією електрохімічних показників однорідності ванни [17—20]. Функціональну схему дослідної установки наведено на рис. 3. Донний продувний блок розміщено на відстані ½ радіуса дна моделі. Продувку здійснювали стиснутим повітрям, яке подавалося компресором через систему регульованої подачі з контролем витрати ротаметром РМ-0,063Г за умов подібності до інтенсивності продувки промислового ковша 0,12—0,32 м³/т·годз інтенсивністю 0,171;

0,342; 0,684; 1,026; 1,368 м³/т год за умов урахування різних густин продувних та продувальних середовищ протягом 10 хв.

У якості електроліту, що дозволяє визначити розповсюдження потоків рідини за часом, використовували сухий NaCl у кількості, необхідній для створення 1 % розчину після повного розчинення у наявному обсязі води, яку додавали всією порцією у однакове місце, поряд з донним продувним блоком. У процесі розчинення та розповсюдження потоками рідини сіль підвищувала електропровідність ванни, що реєструвалося 24-ма датчиками, які було розміщено за чотирма секторами за допомогою багатоканального АЦП Е-140: датчики з 1-ого по 16-й розміщені ярусами вздовж стінок моделі по секторах, датчики 17—20 на дні моделі на відстані ½ радіуса. Датчики 21—24 були закріплені так, щоб вони торкалися поверхні води у спокійному стані (рис. 3).

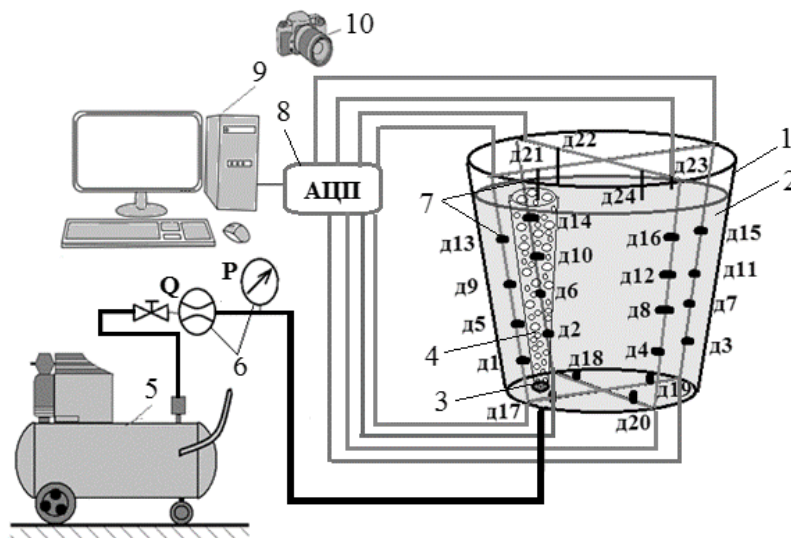


Рис. 3. Функціональна схема дослідної установки для вивчення особливостей перемішування ванни електрохімічним методом у ковші з донною бульбашковою продувкою: 1 — модельна ємність — ківш; 2 — вода, що імітує розплав; 3 — донний продувний блок; 4 — пухирці продувного газу — повітря; 5 — повітряний компресор; 6 — система регулювання подачі повітря (витратомір та манометр); 7 — датчики контролю електропровідності; 8 — АЦП; 9 — ПК; 10 — відеокамера

У ході проведення досліджень було здійснено по п'ять експериментальних продувок при кожній з інтенсивностей подачі продувного газу, результати яких фіксувалися відеозйомкою.

З метою кількісної оцінки перемішування за часом та підтвердження моменту досягнення 1 % розчину використовували оптичний рефрактометр RZ 112 для вимірювання концентрації NaCl у водному розчині. Вимірювання проводили кожні 2 хвилини з моменту введення NaCl і протягом всієї продувки, шляхом забору проби на поверхні ковша та на половині його глибини, кожного разу у встановленій точці.

Аналіз відеоматеріалу продувки при різних інтенсивностях подачі продувного газу дозволив виявити наступні особливості. При продуванні з інтенсивністю на рівні 0,171 м³/т-год потік окремих бульбашок має прямий висхідний характер у вигляді перегорнутого конусу (рис. 4). При збільшенні інтенсивності продувки потік бульбашок має прямий висхідний характер тільки на початковій ділянці, а далі починається «скручення» потоку бульбашок за годинниковою стрілкою відносно днища і потік набуває кутового змінного напрямку. Цей процес посилюється зі збільшенням інтенсивності подачі продувного газу. Також слід відмітити, що починаючи з інтенсивності продувки 1,026 м³/т-год, потік бульбашок починає вертикально пульсувати та при максимальній дослідженій інтенсивності періодично відривався від початкової ділянки, створюючи значні коливання поверхні ванни.

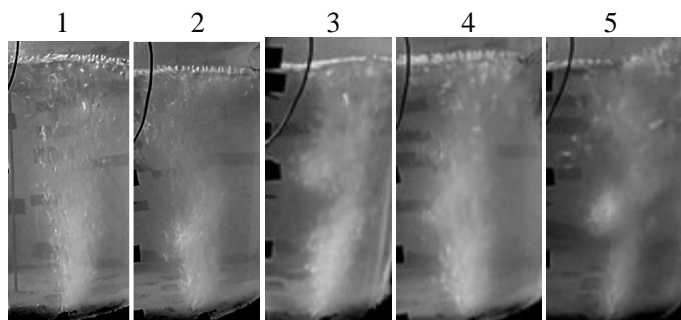


Рис. 4. Характерні фото потоків бульбашок, створюваних різною інтенсивністю продувки: 1 — 0,171; 2 — 0,342; 3 — 0,684; 4 — 1,026; 5 — 1,368 м³/т·год

Аналіз залежності частки ванни, яку візуально охоплював потік бульбашок, від інтенсивності введення газу (рис. 5 А) виявив максимум при інтенсивності продувки близько 1 м³/т·год з подальшим зниженням показників. При цьому мінімальний час досягнення рівномірного перемішування ванни, встановленого як тривалість отримання концентрації 1%-розчину NaCl в об'ємі та на поверхні ванни, у точках, протилежних місцю знаходження продувального блоку (рис. 5 Б), спостерігається при інтенсивності близько 1 м³/т·год .

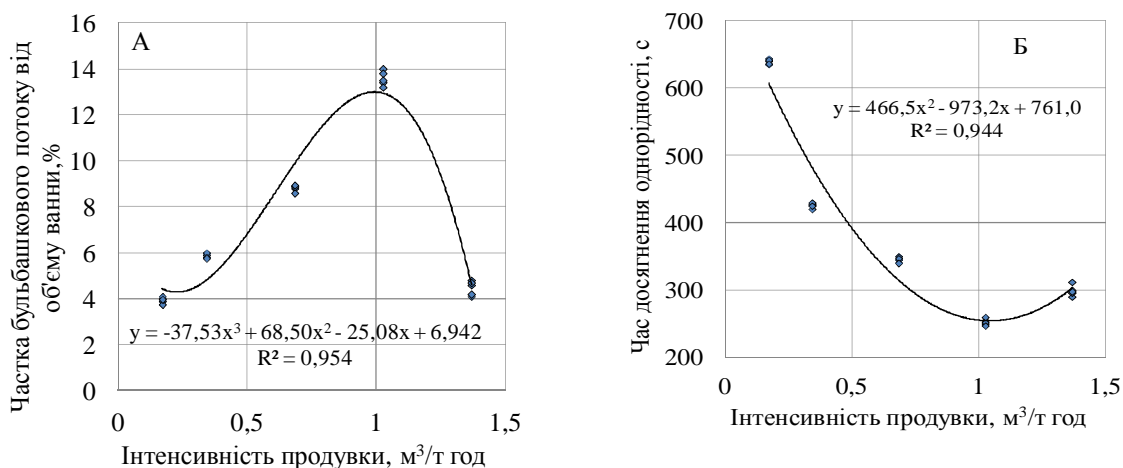


Рис. 5. Залежність частки бульбашкового потоку (А), оціненого візуально за відео зйомкою, та часу досягнення однорідності за показником розчинення NaCl (Б) від інтенсивності продувки ванни

Додатково було отримано результати аналізу зміни електропровідності ванни за час продувки (наведені на рис. б). Відповідно до них, встановлено, що підвищення інтенсивності продувки призводить до підвищення показників зміни електропровідності, що відповідає підвищенню концентрації електроліту у ванні. Тобто, при невеликій інтенсивності продувки (0,171 та 0,342 м³/т·год) перемішування та усереднення ванни відбувається повільніше, й особливо це стосується придонної частини ванни. Збільшення інтенсивності продувки до 0,684 м³/т·год і вище значно активізує масообмінні процеси, у тому числі і в нижній частині ванни ковша. При цьому встановлено, що найбільшій інтенсифікації перемішування досягнуто в середній та верхній частині ванни ковша при інтенсивності продувки 1,026 м³/т·год та 1,368 м³/т·год (криві 4 та 5 на рис. б), а в нижній частині — при інтенсивності 0,684 м³/т·год та 1,368 м³/т·год (криві 3 та 5 на рис. б). Зазначений факт, ймовірно, пов'язано зі встановленим та відміченим вище характером формування потоку бульбашок при таких інтенсивностях продувки.

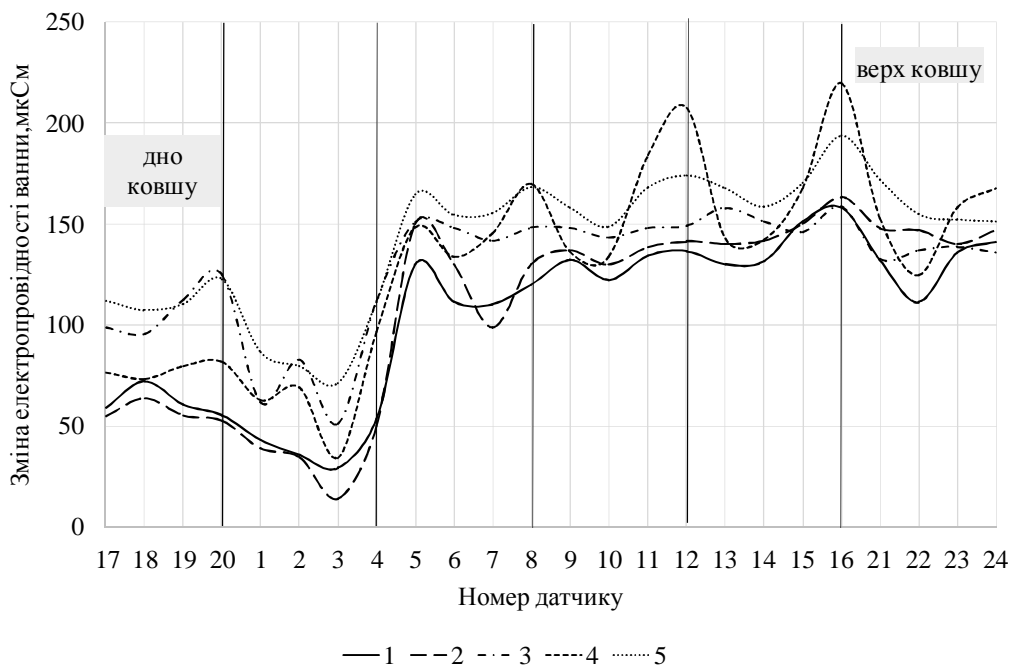


Рис. 6. Усереднені результати виміру зміни електропровідності по висоті ванни за час продувки при різних інтенсивностях: 1 — 0,171; 2 — 0,342; 3 — 0,684; 4 — 1,026; 5 — 1,368 м³/т·год

У ході проведення досліджень додатково встановлено, що найбільші піки отриманих даних різниці електропровідності відповідають датчикам, які розташовані не поблизу потоку продувального газу, а на протилежних напрямках. З цього можна зробити наступні висновки:

- по-перше, масообмінні потоки, спричинені бульбашковою продувкою, охоплюють всю ванну, хоча візуально бульбашки займають тільки невелику частину ванни;
- по-друге, імпульс, отриманий шарами ванни від потоку бульбашок, досить сильний, що спричиняє більший масообмін у протилежній від потоку частині ванни.

Висновки

Проведене розрахунково-аналітичне дослідження, що передбачало розрахунок термодинамічних показників, та дослідження з використанням низькотемпературної моделі перемішування ванни ковша з донною бульбашковою продувкою, показало:

- 1) для умов донної продувки киснем у суміші з нейтральним газом найбільшу пріоритетність перебігу отримують реакції окиснення вуглецю за участю газоподібного кисню;
- 2) інтенсивність перебігу реакції окиснення вуглецю за умов невеликого його вмісту у розплаві буде залежати від активності постачання реагентів, що, у свою чергу, залежить від частки ванни, яка охоплюється бульбашками продувального газу, і від часу, який бульбашки перебувають у ванні;
- 3) для досягнення однорідності ванни за умов експерименту встановлена найбільш раціональна з точки зору охоплення та перемішування ванни бульбашками газу інтенсивність донної продувки: близько 1 м³/т год (при перерахунку на реальний промисловий 250-тонний ківш це відповідає інтенсивності 0,34 – 0,36 м³/т·год);
- 4) при інтенсивності продувки на фізичній моделі близько 1 м³/т год створюється «закручений», пульсуючий потік бульбашок, який залучає найбільшу частину ванни до перемішування, навіть захоплюючи й нижні шари.

Список використаної літератури

1. Найдек В.П. Повышение эффективности металлургических технологий внепечной обработки металлургических расплавов. Материалы международной н.-т. конференции «Производство стали в XXI веке. Прогноз, процессы, технология, экология». К.: КПИ 2000. С. 16–25.
2. Смирнов А.Н., Зборщик А.М. Внепечное рафинирование чугуна и стали. Донецк: Изд-во «Ноулидж», 2012. 179 с.
3. Дюдкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Маринцев С.Н. Производство стали на агрегате ковш-печь. Донецк: ОООЮго-Восток, 2003. 300 с.
4. Pehlke R.D. An Overview of contemporary steelmaking processes. *JOM*. 1982. vol. 34. P. 56 – 64
5. Fandrich R., Lungen H.-B. and Wuppermann C.-D. Actual review on secondary metallurgy. *Rev. Met. Paris*. 2008. vol. 105 (7 – 8). P. 364–374.
6. Лухтура Ф.И. О критической концентрации углерода в расплаве конвертера. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2012. вип. 24. С. 49–56.
7. Сущенко А.В. Определение критической концентрации углерода в конвертере с верхней продувкой. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2003. вип. 13. С. 56–62.
8. Li Y., Zhu H., Wang R., Ren Z., He Y. Bubble behavior and evolution characteristics in the RH isertube – vacuum chamber. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 2022, vol. 10. P. 1053–1064.
9. Cho S.M., Thomas B.G and Kim S.H. Bubble behavior and size distributions in stopper-rod nozzle and mold during continuous casting of steel slabs. *ISIJ International*, 2018. vol.58 (08). P. 1443–1452.
10. Stolte G. Secondary metallurgy: fundamentals, processes, applications. Stahleisen, Düsseldorf, Germany, 2002. 216 p.
11. Lele A.B. & Dutta S.K. Metallurgical Thermodynamics Kinetics and Numericals. S Chand Publishing. 2012. 200 p.
12. Upadhyaya G.S., Dube R.K. Problems in metallurgical thermodynamics and kinetics: international series on materials science and technology. Pergamon. 1977. 270 p.
13. Shamsuddin M. Physical chemistry of metallurgical processes. John Wiley & Sons, Inc. 2016.
14. Rao Y. K. Stoichiometry and thermodynamics of metallurgical processes. 2 volume. Cambridge University Press. 2009. 1013 p.
15. Singh V., Kumar J, Bhanu C., Ajmani S.K., Dash S.K. Optimization of the bottom tuyeres configuration for the BOF vessel using physical and mathematical modeling. *ISIJ Int*. 2007. vol. 47(11). P. 1605–1612.
16. Mazumdar D., Kim H.B., Guthrie R. I. L. Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study. *Ironmak. Steelmak.*, 2000, vol. 27, P. 302–309.
17. Krishnapisharody K., Ballal N.B., Sinha P.K., Sardar M.K., Jha K.N. Water model experiments on mixing phenomena in a VOD ladle. *ISIJ Int*. 1999. vol. 39. P. 419–25.
18. Mandal J., Patil S., Madan M., Mazumdar D. Mixing time and correlation for ladles stirred with dual porous plugs. *Metall. Mater. Trans. B*. 2005. vol. 36B. P. 479–487.
19. Mazumdar N., Mahadevan A., Madan M., Mazumdar D. Impact of ladle desing on bath mixing. *ISIJ Int*. 2005. vol. 45. P. 1940–1942.
20. Liu Z.Q., Li L.M., Li B.K. Modeling of gas – steel – slag three-phase flow in ladle. Metallurgy: Part I. Physical Modeling. *ISIJ Int*. 2017. vol. 57. P. 1971–1979.

COMPREHENSIVE STUDY OF THE CHARACTERISTICS OF THE CARBON OXIDATION PROCESS IN A STEEL LADLE WITH BOTTOM BULB BLOWING WITH A GAS MIXTURE OF THE «OXYGEN — NEUTRAL GAS» SYSTEM

Abstract

The out-of-furnace processing unit has long become an important component of the high-quality steel production chain in modern steelmaking conditions. It provides the iron-carbon liquid semi-product that was produced in an oxygen converter acquires the necessary properties and turns into liquid steel. In addition to carrying out deoxidation, alloying or modification in the ladle during out-of-furnace processing, it is possible to continue the oxidation of impurities to the necessary low levels. Such process should shorten the duration of the previous stage of oxygen blowing and reduce losses of liquid steel with slag due to its possible reoxidation during additional blowing time.

The paper presents the results of the study of the peculiarities of the oxidation process in a steel ladle under the conditions of the bottom supply of a mixture of gases “oxygen — neutral gas” through a porous block. A thermodynamic study of the predicted oxidation process was carried out according to the Gibbs free energy index that reflects the possibility of free course of reactions. This indicator was calculated taking into account the conditions of bottom blowing in the ladle — the influence of the depth of the bath. It was established that carbon oxidation reactions with the participation of gaseous oxygen receive the highest priority. Research on a low-temperature model of the mixing characteristics of a ladle bath with a bottom bubble purge made it possible to evaluate the rational mode of gas introduction for the evaluated conditions. It was established that for effective carbon oxidation, it is necessary to increase the proportion of the bath covered by bubbles of the purge gas and the time of their stay in the bath, sufficient to achieve homogeneity. Such conditions correspond to the physical model's bottom purge intensity of about 1 m³/t h, that creates a “swirling”, pulsating flow of bubbles capable of involving the largest part of the bath in mixing, even capturing the lower layers. When converted to a real industrial 250-ton ladle, this corresponds to an intensity of 0.34—0.36 m³/t·h.

References

- [1] Naidek V. P. (2000) Povishenie effektivnosti metalurgicheskikh tehnologij vnepechnoj obrabotki metallurgicheskikh rasplavov. [*Increasing the efficiency of metallurgical technologies of non-furnace processing of metallurgical melts*]. Materials of the international science and technology conference “Steel production in the XXI century. Forecast, processes, technology, ecology”. Kyiv: KPI. P. 16 – 25. [in Russian].
- [2] Smirnov A. N., Zborshik A. M. (2012) Vnepechnoe rafinirovanie chuguna i stali [*Out-of-furnace refining of cast iron and steel*]. Donetsk: Knowledge Publishing House, 2012. 179 p. [in Russian].
- [3] Dudkin D. A., Bat S. Yu., Grinberg S. Ye., Marintsev S. N. (2003) Proizvodstvo stali na aggregate kovsh-pech [*Steel production on a ladle-furnace unit*]. Donetsk: Yugo — Vostok LLC. 300 p. [in Russian].
- [4] Pehlke R. D. (1982) An overview of contemporary steelmaking processes. JOM. vol. 34. P. 56–64.
- [5] Fandrich R., Lungen H.-B. and Wuppermann C.-D. (2008) Actual review on secondary metallurgy. Rev. Met. Paris. vol. 105 (7 – 8). P. 364–374.
- [6] Lukhtura F.I. (2012) O kriticheskoy koncentracii ugleroda v rasplave konvertera [*About critical concentration of carbon in the converter melt*]. Bulletin of the Azov State Technical University. Technical sciences. vol. 24. P. 49–56. [in Russian]
- [7] Sushenko A.V. (2003) Opredelenie kriticheskoy koncentracii ugleroda v konvertere s verhnej produvkoy [*Determination of the critical carbon concentration in a top-blow converter*]. Bulletin of the Azov State Technical University. Technical Sciences. vol. 13. P. 56–62. [in Russian]
- [8] Li Y., Zhu H., Wang R., Ren Z., He Y. (2022) Bubble behavior and evolution characteristics in the RH riser tube-vacuum chamber. International Journal of Chemical Reactor Engineering. vol. 10, P. 1053–1064.

- [9] Cho S. M., Thomas B. G and Kim S. H. (2018) Bubble Behavior and Size Distributions in Stopper-Rod Nozzle and Mold during Continuous Casting of Steel Slabs. *ISIJ International*. vol.58 (08). P.1443–1452.
- [10] Stolte G. (2002) *Secondary metallurgy: fundamentals, processes, applications*. Stahleisen, Du'sseldorf, Germany. 216 p.
- [11] Lele A.B. & Dutta S.K. (2012) *Metallurgical Thermodynamics Kinetics and Numericals*. S Chand Publishing, 200 p.
- [12] Upadhyaya G. S., Dube R. K. (1977) *Problems in Metallurgical Thermodynamics and Kinetics: International Series on Materials Science and Technology*. Pergamon. 270 p.
- [13] Shamsuddin M. (2016) *Physical Chemistry Of Metallurgical Processes*. John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Rao Y. K. (2009) *Stoichiometry and Thermodynamics of Metallurgical Processes*. 2 Volume. Cambridge University Press. 1013 p.
- [15] Singh V., Kumar J, Bhanu C., Ajmani S.K., Dash S.K. (2007) Optimization of the bottom tuyeres configuration for the BOF vessel using physical and mathematical modeling. *ISIJ Int*. vol. 47(11). P.1605–1612.
- [16] Mazumdar D., Kim H.B., Guthrie R.I.L. (2000) Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study. *Ironmak. Steelmak*. vol. 27, P. 302–309.
- [17] Krishnapisharody K., Ballal N.B., Sinha P.K., Sardar M.K., Jha K.N. (1999) Water model experiments on mixing phenomena in a VOD ladle. *ISIJ Int*. vol. 39. P. 419–25.
- [18] Mandal J., Patil S., Madan M., Mazumdar D. (2005) Mixing time and correlation for ladles stirred with dual porous plugs. *Metall. Mater. Trans. B*. vol. 36B. P. 479–487.
- [19] Mazumdar N., Mahadevan A., Madan M., Mazumdar D. (2005) Impact of ladle design on bath mixing. *ISIJ Int*. vol. 45. P. 1940–1942.
- [20] Liu Z.Q., Li L.M., Li B.K. (2017) Modeling of gas – steel – slag three-phase flow in ladle. *Metallurgy: Part I. Physical Modeling*. *ISIJ Int*. vol. 57. P. 1971–1979.

Надійшла до редколегії 17.10.2024