

ЧУПРИНОВ ЄВГЕН

Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій
<https://orcid.org/0000-0001-8605-3434>
 e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

КОРЕНКО МАРИНА

Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій
<https://orcid.org/0000-0002-4582-1756>
 e-mail: korenko_mg@duet.edu.ua

КАССИМ ДАР'Я

Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій
<https://orcid.org/0000-0002-1750-1237>
 e-mail: kassim@duet.edu.ua

РЕКОВ ЮРІЙ

Технічний університет «Метінвест Політехніка»
<https://orcid.org/0009-0006-0318-0168>
 e-mail: yuriy.rekov@mipolytech.education

МАЛІЙ ХРИСТИНА

Технічний університет «Метінвест Політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-9046-4268>
 e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education

АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ УКРАЇНСЬКИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ПРИКЛАДІ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ». ЧАСТИНА 2. СТАЛЕПЛАВИЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

У статті досліджено вплив різноманітних факторів на температурний режим киснево-конвертерного процесу в умовах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Показано, що температура металу є критично важливим параметром. З метою з'ясування причин коливань температури та оптимізації технологічного процесу було проведено статистичний аналіз паспортів плавки. Встановлено залежності температури металу на першій повалці від температури та маси залитого рідкого чавуну, що дозволило розробити точну модель прогнозування температурного режиму. Виявлено кореляцію між температурою металу під час продування та вмістом марганцю в чавуні. Проаналізовано вплив шихти на температурний режим. Підтверджено, що скрап, спричиняє значне зниження температури. Досліджено вплив "козлового" лому, який, на відміну від брухту, не сприяє охолодженню, а також вапняку (CaCO_3), що використовується для компенсації надлишкової теплоти. Оптимізація використання вапняку є важливою задачею через його відносно низьку реакційну здатність. Запропоновано комплекс коригувальних заходів для підвищення ефективності киснево-конвертерного виробництва. Рекомендовано адаптувати технологічний процес під різні види металобрухту, оптимізувати використання вапняку та коксу, застосовувати вогневе різання для "козлового" лому, здійснювати оперативний контроль температури реакційної зони та впровадити математичну модель управління процесом. Описано метод розрахунку температури випромінюючої поверхні реакційної зони на основі теплового потоку, що передається охолоджуючій воді, з урахуванням витрати кисню та положення фурми. Впровадження запропонованих рішень сприятиме підвищенню гнучкості технології виплавки сталі в умовах нестабільності шихтових матеріалів.

Ключові слова: українська металургія, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», киснево-конвертерний процес, температура металу, шихта, металобрухт, "козловий" лом, вапняк, тепловий баланс, оптимізація, управління, математична модель.

CHUPRYNOV YEVHEN, KORENKO MARYNA, KASSIM DARIA

Educational and Scientific Technological Institute State University of Economics and Technology

REKOV YURIY, MALII KHRYSTYNA

Technical University «Metinvest Polytechnic», Zaporizhzhia

ANALYSIS OF WAYS TO INCREASE COMPETITIVENESS UKRAINIAN METALLURGICAL ENTERPRISES ON THE EXAMPLE OF PJSC "ARCELORMITTAL KRYVIY RIH". PART 2. STEELMAKING PROCESS

The article investigates the influence of various factors on the temperature regime of the oxygen-converter process in the conditions of PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih". It is shown that the metal temperature is a critically important parameter. In order to clarify the causes of temperature fluctuations and optimize the technological process, a statistical analysis of melt passports was conducted. The dependence of the metal temperature on the first tap on the temperature and mass of the poured liquid iron was established, which allowed developing an accurate model for predicting the temperature regime. A correlation was found between the metal temperature during blowing and the manganese content in the iron. The influence of the charge components on the temperature regime was analyzed in detail. It was confirmed that scrap, due to its larger surface area and slag content, causes a significant decrease in temperature. The influence of "goat" scrap, which, unlike scrap, does not contribute to cooling, as well as limestone (CaCO_3), which is used to compensate for excess heat, was investigated. Optimization of limestone utilization is an important task due to its relatively low reactivity. A set of corrective measures is proposed to increase the efficiency of oxygen-based furnace production. It is recommended to adapt the technological process to different types of scrap, optimize the use of limestone and coke, apply flame cutting for "goat" scrap, carry out operational control of the reaction zone temperature, and implement a mathematical model of process control. A method for calculating the temperature of the radiating surface of the reaction zone based on the heat flux transferred to the cooling water, taking into account the oxygen consumption and the position of the lance, is described. The implementation of the proposed solutions will contribute to increasing the flexibility of steelmaking technology in conditions of instability of charge materials.

Keywords: Ukrainian metallurgy, PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih, BOF process, metal temperature, charge, scrap metal, "goat" scrap, limestone, heat balance, optimization, control, mathematical model.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

В першій статті даного циклу були відмічені серйозні труднощі, з котрими стикнулася українська металургія. Труднощі з технологічними процесами, їх вдосконаленням та реалізацією продукції відчували на собі всі ланки металургійного виробництва, в тому числі й сталеплавильний переділ.

Як було відмічено раніше, найбільш конкурентоспроможним підприємством в Україні, на думку авторів статті, є ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Перспективи розвитку сталеплавильного виробництва в більшій мірі залежать від перспектив прокатного виробництва та потенціалу щодо розширення асортименту готового металопрокату. Тим не менше, певний ряд сучасних технологій може бути впроваджений без орієнтації на інші ланки виробництва через їх спрямованість виключно на процеси виплавки сталі.

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» має потужний сталеплавильний департамент, який складається з 6 кисневих конверторів ємністю 160 тон, котрі здатні забезпечити річну продуктивність на рівні 6,5 млн тон сталі. Розливання сталі забезпечується двома технологіями – традиційною розливкою зверху у виливниці ємністю 8-12 тон та відділенням безперервної розливки сталі, в склад котрої входять 3 установки піч-ківш та 3 машини безперервного розливання.

Результати досліджень свідчать про недостатню ефективність сучасних методів регулювання вмісту вуглецю для забезпечення стабільного хімічного складу сталі під час першої плавки [1, 2].

У роботах В.С. Богушевського та його співавторів [3, 4] представлено значний внесок у вирішення проблеми. Ними розроблено комплекс математичних моделей, що включають статичний аналіз, динамічне моделювання та алгоритми автоматичного керування процесом плавки. Крім того, моделювання технологічних процесів та впровадження розроблених моделей у промисловість є беззаперечним трендом останніх років серед іноземних дослідників, що відображено у великій кількості робіт [5-17].

Формулювання цілей статті

Метою цього дослідження є аналіз можливих шляхів для вдосконалення сталеплавильного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з метою збільшення продуктивності, зменшення собівартості та поліпшення якості сталі.

Виклад основного матеріалу

У киснево-конвертерному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» температура металу є критичним параметром, оскільки майже половина (~ 44 %) всіх додувок відбувається для її регулювання. Для з'ясування причин коливань температури та оптимізації процесу було проведено статистичне дослідження паспортів плавок.

На базі цього аналізу вдалося отримати ряд важливих взаємозв'язків, характерних для умов киснево-конвертерного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [18]. Так, були отримані рівняння залежностей температури металу на першій повалці від температури рідкого чавуну та його кількості, що заливається у конвертер. Завдяки цьому технологи отримали досить точну модель прогнозування температурного режиму.

Не менш важливою залежністю, яку вдалось виявити, стала залежність між температурою металу у різні моменти продування та вмістом марганцю в чавуні. У відповідності до цього взаємозв'язку, збільшення кількості марганцю призводить до зменшення температури металу. Дана залежність має велику важливість, враховуючи не стабільну роботу міксерного відділення, досить часті проблеми з усередненням чавуну в міксерах і, навіть, не рідкою роботою «з коліс» – коли рідкий чавун заливається у конвертора одразу приїжджаючи із доменного цеху.

Важливою складовою процесу виплавки сталі є металевий брухт. Найзначущим трендом останніх років стало те, що великі металургійні компанії почали приділяти більшу увагу брухтозаготівельному бізнесу. Так, восени 2021 року у США компанія BlueScore купила за 240 млн. дол. брухтозаготівельну компанію MelalX; завод Cleveland Cliffs купив за 775 млн. дол. компанію FPT [19].

На ринку металобрухту України спостерігається постійний дефіцит, що іноді змушує підприємства використовувати менш якісну сировину. В таких умовах пошук варіантів більш ефективного застосування «брухтоподібних» продуктів стає досить важливою технологічною задачею.

В рамках проведеного дослідження [18] були також отримані залежності технологічних показників від кількості брухту і його різних заміників. Для шихтових умов киснево-конвертерного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» отримано рівняння залежності температури металу на першій повалці від кількості металобрухту в завалці та показано, що зменшення кількості металобрухту призводить до зростання температури, так як останній «працює» в якості охолоджувача.

Також був проаналізований вплив скрапу, «козлового» лому та вапняку.

Аналіз паспортів плавок показав, що потрапляння скрапу у завалку призводить до зниження температури металу в більшій мірі, ніж при використанні металевого брухту. Це пов'язано з тим, що скрап надходить з певним ступенем зашлакованості, що збільшує його охолоджуючу здатність. Вплив зашлакованості скрапу на температурний режим киснево-конвертерного процесу полягає у зміні теплового балансу системи. Наявність шлакових включень в скрапі зумовлює збільшення теплоємності

та зміну характеру теплопередачі, що приводить до зниження температури металу на першій повалці при збільшенні в шихті скрапу. Крім того, зашлакований скрап має більшу ефективну площу поверхні, що сприяє інтенсифікації теплообміну та, як наслідок, зниженню температури металу при збільшенні його вмісту в шихті.

Термічний вплив «козлового» лому на металургійний процес характеризується особливостями, що полягають у підвищенні температури металу при збільшенні його кількості в завалці. Дана залежність підкреслює той факт, що «козловий» лом не виконує функцію охолоджувача та сприяє збільшенню кількості необхідних додувок для досягнення заданих параметрів. При відборі проби неоплавлений лом викликає додаткові тепловтрати за рахунок охолоджуючого ефекту, що становить 1400-1500 кДж/кг. Це відповідає аналогічному показнику для металобрухту. У зв'язку з цим, технологи змушені здійснювати коригування температури з перевищенням температурного режиму плавки.

Оптимізація теплового балансу в сталеплавильному виробництві досягається використанням вапняку (CaCO_3) як компенсатора надлишкової теплоти. Вапняк є досить ефективним компенсатором надлишкової теплоти, його охолоджуючий ефект становить 12070 кДж на 1 т чавуну. Недоліком даного матеріалу є його відносно низька реакційна здатність, що призводить до необхідності збільшення його кількості для досягнення оптимального теплового балансу та продуктивності сталеплавильного агрегату. Виробничий персонал змушений збільшувати витрати вапняку на 30-40 %, що в еквіваленті становить 130-140 кг CaCO_3 на 1 т чавуну.

Аналіз теплофізичних властивостей металобрухту та скрапу, зокрема їх теплоємностей, служить поясненням щодо проблеми зниження температури плавки, яка актуальна для технології ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Оскільки в середньому на одну плавку припадає 10 т скрапу, можливо розрахувати величину втраченої теплової енергії, зумовлену низькою теплоємністю та значним охолоджуючим ефектом скрапу.

На основі проведеного аналізу був запропонований комплекс корегуючих заходів, які дозволяють підвищити техніко-економічні показники киснево-конвертерного цеху та зробити технологію виплавки сталі більш гнучкою в умовах нестабільності шихтових матеріалів. Так, при при переробці металобрухту різних категорій, технологічний процес плавки потребує адаптації під кожен конкретний випадок. Зокрема, при переплавіччю чушкового чавуну рекомендується введення вапняку (CaCO_3), як додаткового охолоджувача в кількості 130-140 кг/т чавуну. Зазначений захід сприяє зменшенню кількості коригуючих добавок по вуглецю та запобігає перегріву металевого розплаву. Застосування номограми залежності вмісту кремнію в чавуні від витрати вапна, у поєднанні з додаванням вищезазначеної кількості вапняку, забезпечує досягнення необхідної температури плавки у 85 % випадків, що позитивно впливає на вихід придатного металу. При переплавіччю скрапу встановлено чітку залежність між кількістю скрапу та температурою на першому етапі плавлення. Для забезпечення оптимального температурного режиму, рекомендовано додавання теплоносіїв, зокрема меленого коксу, в кількості 120 кг/т скрапу. За умов дотримання технологічних параметрів, досягається температура 1610 °C та необхідний вміст вуглецю. Додавання коксу сприяє збільшенню кількості зливів з однієї повалки до 75 %. «Козловий» лом, частка якого становить 8 % від загальної маси на плавках, є найбільш проблемним компонентом киснево-конвертерного процесу через значні коливання його хімічного складу. Вміст вуглецю в ньому може варіюватися в межах 3-5 %, а сам матеріал може мати багатошарову структуру з різним хімічним складом. Для вирішення цієї проблеми, найбільш ефективним методом є вогневе різання для подрібнення «козлового» скрапу. У разі відсутності можливості вогневого різання, рекомендується передбачити перегрів металу на 20-30 °C для компенсації можливих відхилень від цільового вікна «температура – вуглець».

Прогнозування моменту завершення процесу продування киснем та моніторинг ключових параметрів конвертерної плавки можливі шляхом розрахунку температури розплаву (реакційної зони) в реальному часі. Оперативне визначення температури розплаву (реакційної зони) базується на використанні рівнянь теплового балансу, що враховують теплове випромінювання реакційної зони на водоохолоджувану кисневу фурму та кількість теплоти, що відводиться водою від кисневої фурми.

Враховуючи це, для умов конвертерного виробництва ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» була запропонована модель управління технологічним процесом [20], що базується на новому параметрі – температурі випромінювання поверхні реакційної зони. Розрахунок температури розплаву базується на комплексі вхідних даних, що включають: температуру води, її об'ємну витрату та тиск на вході та виході кисневої фурми; температуру, об'ємну витрату та тиск кисню, що подається. Математична модель для визначення температури розплаву враховує параметри кисневої фурми, характеристики вихідної сировини, марку сталі, що виплавляється, а також результати хімічного аналізу проб та дані, отримані шляхом безпосереднього вимірювання температури під час «повалки» конвертера.

Метод визначення температури випромінюючої поверхні реакційної зони базується на вимірюванні теплового потоку, що передається охолоджуючій воді, та врахуванні впливу витрати кисню та положення фурми за допомогою відповідних коефіцієнтів. Розрахунок температури здійснюється за допомогою алгоритму, реалізованого на комп'ютері, що дозволяє отримувати дані про температуру протягом усього процесу плавки.

Представлені результати обчислень та запропоновані методи оптимізації газодуттєвого режиму, спрямовані на зменшення споживання кисню в процесі обробки розплаву, дозволяють технологам досягти необхідного рівня зниження окислення сталі та мінімізувати витрати розкислювачів під час розливання сталі. Зазначені методи також можуть бути використані для прогнозування можливості часткової заміни кисню повітрям без погіршення гідродинамічних характеристик ванни.

Впровадження математичної моделі та системи автоматизованого управління плавкою, що базується на оперативному моніторингу температури реакційної зони, дозволить оптимізувати тривалість "повалок" кисневого конвертера при отриманні сталі з заданими властивостями, а також скоротити тривалість плавки на 2-3 хв. (до 4 %).

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших досліджень у даному напрямі

Дослідження виявили значний вплив різних компонентів шихти на температуру металу. Встановлено, що металобрухт діє як охолоджувач, тоді як скрап, через свою зашлакованість та більшу площу поверхні, призводить до більшого зниження температури. «Козловий» лом, навпаки, сприяє підвищенню температури. Вапняк, хоча й є ефективним компенсатором надлишкової теплоти, потребує збільшення витрат через низьку реакційну здатність. Ці дослідження підкреслюють необхідність ретельного контролю та оптимізації складу шихти для досягнення бажаного температурного режиму.

Температура рідкого чавуну та його кількість, що заливається в конвертер, є ключовими факторами, що впливають на температуру металу на першій повалці. Вміст марганцю в чавуні також має значний вплив на температуру металу під час продування. Ці залежності дозволяють прогнозувати температурний режим та коригувати процес для досягнення необхідних параметрів.

Для підвищення ефективності та гнучкості киснево-конвертерного виробництва необхідний комплексний підхід, що включає: адаптацію технологічного процесу під різні категорії металобрухту, оптимізацію використання вапняку та інших добавок, контроль та регулювання температури реакційної зони, впровадження математичних моделей та систем автоматичного управління.

Впровадження цих заходів дозволить скоротити час плавки, зменшити витрати матеріалів та досягти стабільних параметрів якості сталі. Не зважаючи на те, що запропоновані заходи були визначені для умов ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», тенденції, виявлені в результаті досліджень, будуть актуальними і для інших киснево-конвертерних цехів металургійних заводів.

Література

1. Ueda S. *Steelmaking Technologies—Present and Future. Treatise on Process Metallurgy*. 2024. P. 153–166. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85480-1.00013-0>.
2. Yanping B., Shiqi L. *Steelmaking. The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Singapore, 2024. P. 2038–2043. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_995.
3. V.S. Bogushevskij and K.V. Yegorov, "Control of bath dynamics during purge as a component of converter melting control system", *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 2013, № 1, S. 51-56.
4. V.S. Bogushevskij, S.G. Melnik and S.V. Zhuk, "Steel decarburization as the main parameter of optimal control of oxygen-converter smelting", *Metall i lityo Ukrainy*, 2014, № 2, S. 14-16.
5. A Dynamic Analytics Method Based on Multistage Modeling for a BOF Steelmaking Process / C. Liu et al. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2019. Vol. 16, no. 3. P. 1097–1109. URL: <https://doi.org/10.1109/tase.2018.2865414>.
6. An In-Situ Analysis Method in EAF and BOF Steelmaking / B. Mitas et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2024. Vol. 1309, no. 1. P. 012002. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1309/1/012002>.
7. Chen E., Coley K. S. Kinetic study of droplet swelling in BOF steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2010. Vol. 37, no. 7. P. 541–545. URL: <https://doi.org/10.1179/030192310x12700328926100>.
8. Intelligent BOF Steelmaking System – Research and Application of Intelligent BOF Steelmaking / L. Ai et al. *AISTech2019*, 6–9 May 2019. URL: <https://doi.org/10.33313/377/097>.
9. INTELLIGENT CONTROL METHOD and APPLICATION for BOF STEELMAKING PROCESS / T. Jun et al. *IFAC Proceedings Volumes*. 2002. Vol. 35, no. 1. P. 439–444. URL: <https://doi.org/10.3182/20020721-6-es-1901.00726>.
10. Mitas B., Visuri V.-V., Schenk J. Modeling the Residence Time of Metal Droplets in Slag During BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02808-2>.
11. Model for prediction of oxygen required in BOF steelmaking / Z. Wang et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2012. Vol. 39, no. 3. P. 228–233. URL: <https://doi.org/10.1179/1743281211y.0000000085>.
12. Shuming Xie, Jun Tao. BOF steelmaking endpoint control. *The 2002 International Conference on Control and Automation, 2002. ICCA. Final Program and Book of Abstracts.*, Xiamen, Fujian Province, China. URL: <https://doi.org/10.1109/icca.2002.1229812>.
13. Simulation of Flow Fluid in the BOF Steelmaking Process / M. Lv et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013. Vol. 44, no. 6. P. 1560–1571. URL: <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9935-4>.

14. Ueda S. Steelmaking Technologies–Present and Future. *Treatise on Process Metallurgy*. 2024. P. 153–166. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85480-1.00013-0>.
15. Water modeling on fluid flow and mixing phenomena in a BOF steelmaking converter / X.-y. Cai et al. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s42243-023-01072-7>.
16. Yanping B., Shiqi L. Steelmaking. *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Singapore, 2024. P. 2038–2043. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_995.
17. Zhu Y. P., Zhao X. D., Xu S. L. Predictive Model for BOF Steelmaking Using RBF Neural Network. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 58-60. P. 1214–1218. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.58-60.1214>.
18. Rad'ko, N. G., Chuprinov, E. V., Lyalyuk, V. P., Korenko, M. G., Krivenko, V. V. (2020). Аналіз причин додувок у конвертерному виробництві сталі та шляхи їх усунення. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (40), 88–95. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.40.2020.216183>.
19. Development of supplements prevention system in oxygen converter process in order to increase the economic efficiency of steel melting / Evhen Chuprinov, Vitalij Lyalyuk, Hanna Andrushchenko, Daria Kassim, Natalia Rad'ko // SHS Web of Conferences 100, 06001 (2021), ISCSAI 2021. P. 1-9. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110006001>.
20. Rad'ko N.G., Chuprinov E.V., Lyalyuk V.P., Korenko M.G., Krivenko V.V. (2020). Управління технологічним процесом конвертерної плавки по розрахунковій температурі реакційної зони. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (41), 70–75. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226184>.