

© Радько Н.Г.¹, Чупринов Є.В.², Лялюк В.П.³,
Коренко М.Г.⁴, Кривенко В.В.⁵

АНАЛІЗ ПРИЧИН ДОДУВОК У КОНВЕРТЕРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ ТА ШЛЯХИ ЇХ УСУНЕННЯ

Проведено дослідження та аналіз причин додувок сталі в конверторі з розробкою заходів по їх зменшенню. Запропоновані шляхи усунення додувок плавки в залежності від шихтових умов, зокрема, різних категорій лому за рахунок більш точної шихтовки плавки та проведення коригувальних технологічних операцій під час продувки металевого розплаву.

Ключові слова: виплавки сталі, лом, чушковий чавун, додувки, корегування, вапняк, коксик.

Радько Н.Г., Чупринов Є.В., Лялюк В.П., Коренко М.Г., Кривенко В.В. Анализ причин додувок в конвертерном производстве стали и пути их устранения. Проведено исследование и анализ причин додувок стали в конвертере с разработкой мероприятий по их уменьшению. Предложены пути устранения додувок плавки в зависимости от шихтовых условий, в частности, различных категорий лома за счет более точной шихтовки плавки и проведения корректирующих технологических операций при продувке металлического расплава.

Ключевые слова: выплавки стали, лом, чушковый чугун, додувки, корректировка, известняк, коксик.

N.G. Rad'ko, E.V. Chuprinov, V.P. Lyalyuk, M.G. Korenko, V.V. Krivenko. Analysis of the causes of additional blowings in converter steel production and ways of their elimination. The article analyzes the work of the oxygen-converter shop of PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih». It has been shown that almost half of the total number of additional oxygen blowings (~ 44%) is necessitated by the temperature. In order to improve the conditions of steel smelting and to reduce resource costs, calculations have been performed and new technological solutions in steel smelting to reduce the number of additional oxygen blowings have been found. The study of real smeltings demonstrated the need for corrective operations in the steel smelting using metal scrap of different types. For example, the use of cast iron requires an additional consumption of limestone in the amount of 130-140 kg per 1t of cast iron to reduce the amount of heat entering the bath. It is shown that the use of this technique makes it possible to decrease the number of additional blowings caused by the carbon amount as well as the increased temperature of the melting. It has been concluded that the most effective method of technological process control in smelting with cast iron is the integrated use of limestone and additional application of the nomogram of the dependence of silicon content in cast iron and lime consumption. Smeltings with the use of scrap exhibit a clear relationship between the amount of scrap in the charge and the temperature of the melt in the first dump. To compensate for temperature fluctuations caused by the addition of scrap, it is recommended to add ground

¹ старший викладач, Криворізький металургійний інститут НМетАУ, м. Кривий Ріг,

² канд. техн. наук, доцент, Криворізький металургійний інститут НМетАУ, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Криворізький металургійний інститут НМетАУ, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7258-2079, vitalij.lyalyuk@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Криворізький металургійний інститут НМетАУ, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0002-4582-1756

⁵ канд. техн. наук, доцент, Криворізький металургійний інститут НМетАУ, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-7822-6358

coke in the amount of 120 kg per each ton of scrap. Calculations show that in this case, the required temperature close to 1610°C and the given carbon content are achieved in 75% of cases. The addition of «gantry» scrap to the charge has a number of uncontrolled effects on the process due to significant fluctuations in the chemical composition of this type of metal charge. The most technologically feasible solution to problems with additional blowings when using «gantry» scrap is fire cutting of the scrap. If such an operation is impossible, it is recommended to overheat the metal by 30°C to increase the degree of its penetration.

Keywords: steel smelting, scrap, pig iron, additional blowings, adjustment, limestone, coke.

Постановка проблеми. Сучасний період розвитку металургійної промисловості характеризується інтенсифікацією виробництва, що полягає в безперервному підвищенні питомої й абсолютної продуктивності металургійних агрегатів, удосконаленні сортаменту металопродукції, що випускається, і підвищенні її якості, що забезпечує скорочення питомих витрат металу, енергоресурсів і трудових витрат. У результаті масштаб виробництва навіть металомістких готових виробів збільшується при відсутності росту виплавки сталі.

Поряд зі зменшенням витрат металу є проблема, пов'язана із втратами при виробництві. Одна із проблем – це додувки при виробництві сталі, на яких знижується продуктивність агрегату та погіршується якість сталі. Основною причиною додувок є нестабільний склад металошихти та різні коливання температури шихти, що завантажуються [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ряд досліджень вказують, що наявні методи контролю за вмістом вуглецю не забезпечують отримання сталі заданого хімічного складу з першої повалки [2, 3]. Суттєвий вклад у вирішення даної проблеми зроблено у роботах В.С. Богушевського із співавторами [2-4], котрими розроблено ряд математичних моделей, що включають статичний розрахунок, динамічний прогноз та механізми керування плавкою у замкнутому режимі. У роботі [5] розроблена вдосконалена методика розрахунку матеріально-теплового балансу киснево-конвертерної виплавки сталі, що збільшує гнучкість процесу виплавки сталі за рахунок використання впливу більш коректних умов плавки. Це дозволить покращити технологічний процес та суттєво знизити кількість додувок. Тим не менше, всі наявні в даний момент розробки не дозволяють остаточно вирішити цю проблему, а тому пошук додаткових механізмів керування конвертерним процесом є актуальною проблемою.

Мета статті – аналіз паспортів плавок на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», виконання розрахунків та пошук нових технологічних рішень при виплавці сталі для зменшення кількості додувок.

Виклад основного матеріалу. Згідно аналізу роботи киснево-конвертерного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» майже половина від усієї кількості додувок (~ 44%) здійснюється по температурі. Для визначення впливу різних факторів на температуру металу проведені статистичні дослідження паспортів плавок КЦ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Фізичне тепло рідкого чавуну вносить у конвертерну ванну близько 50-54% усього тепла, а збільшення температури чавуну, що заливається, відповідно призводить до збільшення температури ванни.

Залежність T_m металу на першій повалці від температури чавуну (рис. 1) представлена рівнянням:

$$T_m = 1425,52 + 0,121 \cdot T_{\text{ч}}, \quad (1)$$

де T_m – температура металу на першій повалці, °C; $T_{\text{ч}}$ – температура чавуну, що заливається в конвертер, °C.

Вплив кількості чавуну, що заливається, на температуру металу на першій повалці (рис. 2) виражається рівнянням:

$$T_m = 1494,55 + 1,193 \cdot Q, \quad (2)$$

де Q – кількість чавуну, що заливається, %.

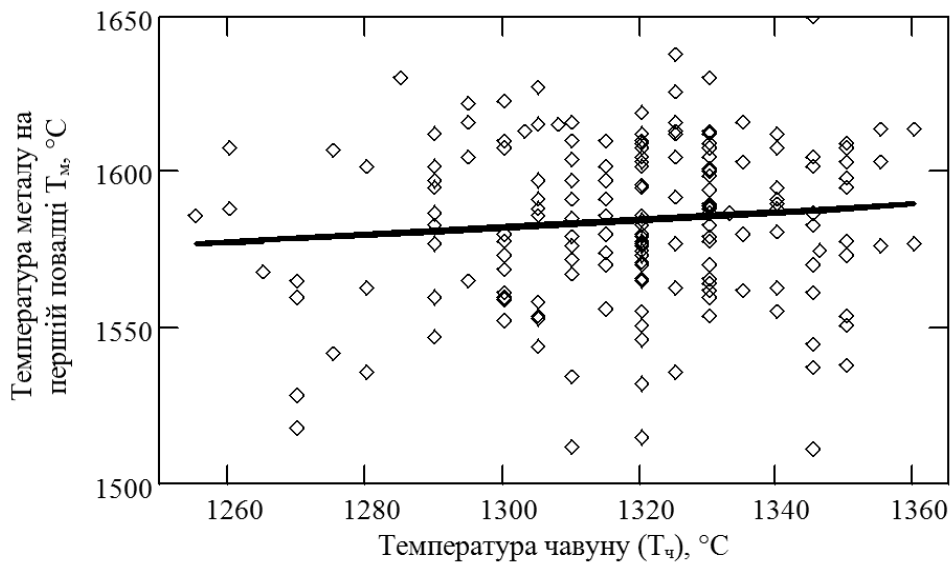


Рис. 1 – Залежність температури металу на першій повалці від температури чавуну

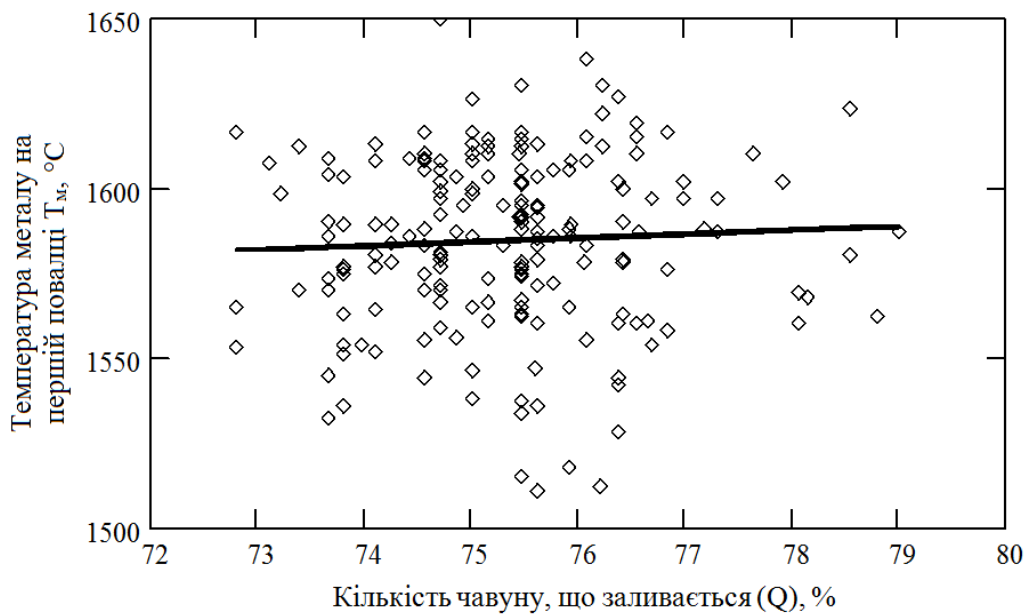


Рис. 2 – Залежність температури металу на першій повалці від кількості чавуну

Виявлена також залежність температури металу від вмісту Mn у чавуні – зі збільшенням вмісту марганцю в чавуні зменшується температура металу (рис. 3):

$$T_m = 1602,11 - 37,634 \cdot [Mn]_ч, \tag{3}$$

де $[Mn]_ч$ – вміст марганцю в чавуні, %.

Зі зменшенням кількості лому в завалці підвищується температура металу на першій повалці (рис. 4). Це пов'язано з тим, що лом є охолоджувачем плавки, на його розчинення витрачається певна кількість тепла. Ця залежність виражається рівнянням:

$$T_m = 1615,24 - 1,248 \cdot P, \tag{4}$$

де P – доля лому в металошихті, %.

Скрап надходить у завалку з певним ступенем зашлакованості, його охолоджуюча здатність більше, ніж у чистого лома. Усе це сприяє тому, що зі збільшенням кількості зашлакованого скрапу в завалці спостерігається зниження температури металу (рис. 5). Ця залежність виражається рівнянням:

$$T_m = 1585,76 - 0,972 \cdot P_c, \tag{5}$$

де P_c – доля скрапа в металозавалці, %.

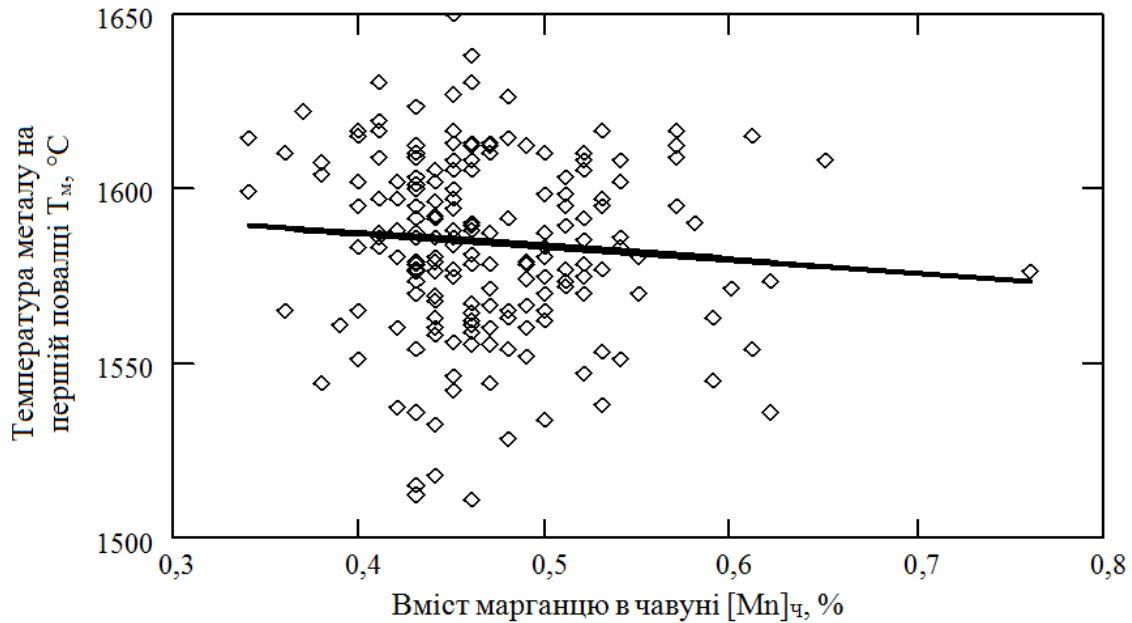


Рис. 3 – Залежність температури металу на першій повалці від вмісту Mn у чавуні

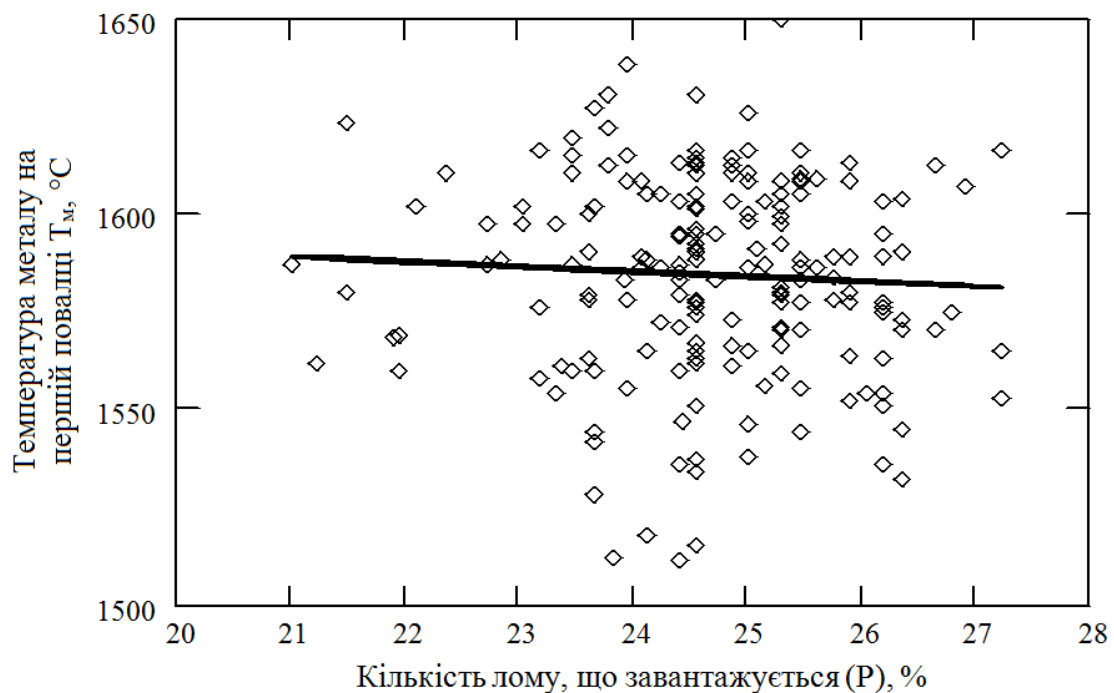


Рис. 4 – Залежність температури металу на першій повалці від кількості лому, що завантажується

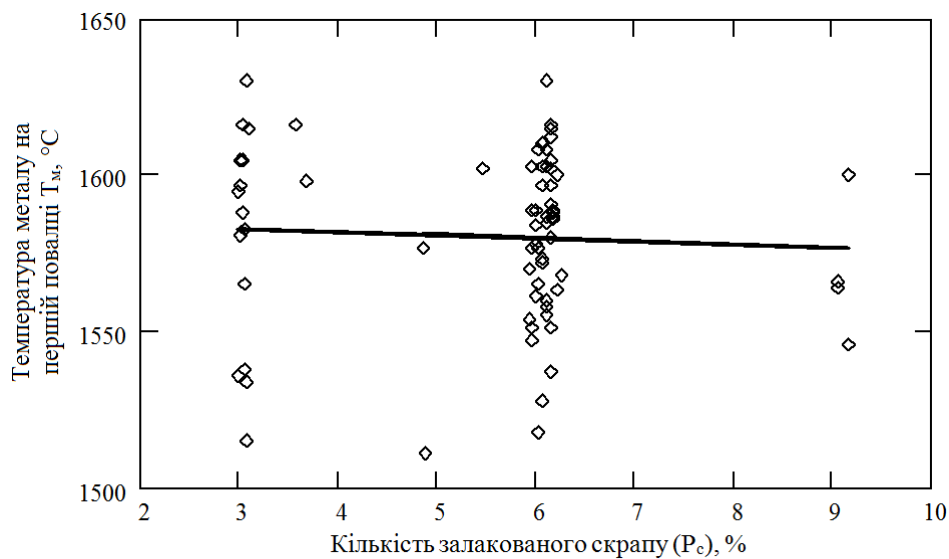


Рис. 5 – Залежність температури металу на першій повалці від кількості зашлакованого скрапу, що завантажується

Вплив так званого «козлового» лому має дещо інший характер. Зі збільшенням кількості «козлового» лому, що завантажується, спостерігається підвищення температури металу (рис. 6).

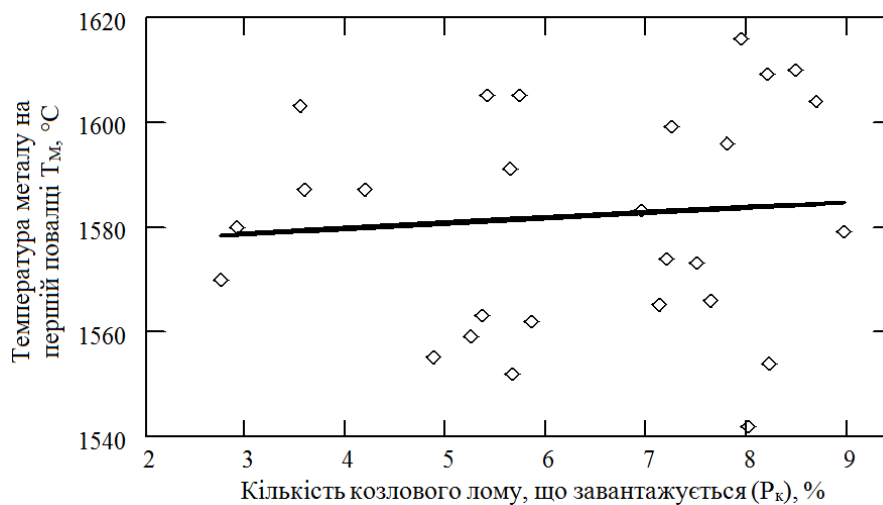


Рис. 6 – Залежність температури металу на першій повалці від кількості «козлового» лому, що завантажується

Усі ці залежності підтверджують той факт, що «козловий» лом фактично не виконує свою функцію охолоджувача та призводить до збільшення кількості додувок. При відборі проби не оплавлений лом збільшує відвід тепла за рахунок охолоджуючого ефекту, котрий становить 1400-1500 кДж/кг, що дорівнює аналогічному показнику металобрухту. Внаслідок чого технологи змушені виконувати операції додувки по температурі з перегрівом плавки [6].

Виразення цієї залежності показано наступним рівнянням:

$$T_m = 1575,61 - 1,007 \cdot P_k, \quad (6)$$

де P_k – доля «козлового» лому в металошихті, %.

Для проведення конвертерної плавки необхідна кількість теплоти, в середньому, рівна 285641 МДж. Із них найбільшу кількість приходу теплоти (50-54%) дає фізичне тепло чавуну,

який надходить із доменного цеху. На частку хімічного тепла доводиться 34-35% приходу теплоти (при переробці чушкового чавуну кількість додаткової теплоти трохи збільшується). Доменний шлак, котрий потрапляє в конвертер з мікзера, вносить близько 0,6% теплоти [7].

Так, при переробці чушкового чавуну масою 10 т такого ж хімічного складу, як передільний чавун, додатково вноситься:

$$\begin{aligned} [C] &= 1,10 - 0,20 = 0,90\% = 378 \text{ кг } [C]; \\ [Si] &= 0,23 - 0,08 = 0,15\% = 63 \text{ кг } [Si]; \\ [Mn] &= 0,46 - 0,46 = 0,00\% = 0 \text{ кг } [Mn]; \\ [P] &= 0,06 - 0,04 = 0,02\% = 8,4 \text{ кг } [P], \end{aligned}$$

що дає за рахунок хімічних реакцій прихід тепла:

$$Q_{\text{ч.хім.}} = 14770 \cdot 0,9 + 26970 \cdot 0,15 + 21730 \cdot 0,02 = 17773 \text{ кДж.}$$

Тобто на 1 тону чушкового чавуну надходить у ванну конвертера додатково 17773 кДж. Охолоджувальний ефект чушкового чавуну трохи більший, ніж в порівнянні зі звичайним ломом, що пов'язано із меншим гранулометричним складом та, відповідно, більшою площею взаємодії (табл. 1).

Таблиця 1

Кількість теплоти, що віддається, металодобавкою

Найменування	Лом (1 т)	Чушковий чавун (1 т)
Теплоємність	714 кДж	2256 кДж
Охолоджувальний ефект	- 1,45 МДж	- 1,8 МДж
Усього	- 0,736 МДж	0,456 МДж

Як видно с табл. 1, різниця в приході теплоти становить 1,192 МДж на 1 т чушкового чавуну. Найбільш ефективним компенсатором надлишкової теплоти з точки зору економічної доцільності є вапняк (CaCO_3), охолоджуючий ефект котрого становить 12070 кДж на 1 т чавуну. Головний недолік вапняку – низька реакційна здатність, котра не дозволяє оптимальній його кількості прореагувати у необхідному інтервалі часу для забезпечення високої продуктивності сталеплавильного агрегату. У результаті цього, технолог вимушений збільшувати кількість витрат вапняку на 30-40%, що у загальному еквіваленті становить 130-140 кг CaCO_3 на 1 т чушкового чавуну.

Наряду із чушковым чавуном використовується сталевий скрап, ступінь забруднення котрого коливається у межах від 5 до 40%, що негативно впливає на прихід тепла. Теплоємність лому становить 714 кДж/т. А з теплоти утворення й вмісту хімічних речовин у шлаку, зі скрапу можна обчислити його теплоємність [7]:

$$\begin{aligned} \text{FeO} &= 23,32 \text{ кДж}; \\ \text{Fe}_2\text{O}_3 &= 23,86 \text{ кДж}; \\ \text{CaO} &= 168,72 \text{ кДж}; \\ \text{SiO}_2 &= 108,51 \text{ кДж}; \\ \text{MgO} &= 49,97 \text{ кДж}; \\ \text{Al}_2\text{O}_3 &= 88,83 \text{ кДж}; \\ \text{MnO} &= 40,08 \text{ кДж}; \\ \text{S} &= 0,133 \text{ кДж}; \end{aligned}$$

$$\text{Загалом:} = 503 \text{ кДж.}$$

Аналіз різниці теплоємностей лому та скрапу (714 кДж/т та 503 кДж/т, відповідно) дає научну відповідь на питання технологів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» щодо великої кількості «холодних» плавок, котрі йдуть зі скрапом. Враховуючи, що кількість скрапу в середньому становить 10 т на плавку, стає можливим виконати розрахунок кількості втраченої теплоти через малу теплоємність і величезний охолоджуючий ефект. Так, у лому він коливається в межах 1400-1500 кДж/т, а у скрапу – 1600-1800 кДж/т. Кількість у скрапі шлаків становить 20%, а прихід тепла з 1 тонни складає 671,8 кДж [7]. Теплоємність скрапу менше ніж у лому на 42,2 кДж/т. Поряд із цим спостерігається різке збільшення охолоджувального ефекту лому (табл. 2).

Таблиця 2

Охолоджувальний ефект лома й скрапу

Найменування	Лом (1 т)	Скрап (1 т)
Теплоємність	714 кДж	671,8 кДж
Охолоджувальний ефект	- 1,45 МДж	- 1,7 МДж
Усього	- 0,736 МДж	- 1,028 МДж

Як видно з табл. 2, різниця між ломом і скрапом становить 0,292 МДж на 1 т металобрухту, що потребує додаткових технологічних операцій для її нівелювання. Найбільш доцільним в цьому випадку є додавання меленого коксика в продувку. Розрахунки, виконані згідно існуючих моделей матеріально-теплового балансу виплавки сталі у кисневому конверторі [8], демонструють, що для утворення такої кількості теплоти необхідно 104,65 кг вуглецю або 120 кг коксика на кожну тону скрапу.

Вивчення паспортів плавок демонструє, що на частку «козлового» скрапу доводиться 8% від усіх плавок. В аналізі цих плавок зауважується тенденція, що при збільшенні кількості «козлового» скрапу зростає температура на першій повалці, що пов'язано, в основному, з неповним проплавленням скрапу. Це підтверджується і даними щодо середнього виходу металу. Так, при звичайній шихтовці вихід металу становить 146,9 т, а при переробці «козлового» скрапу – 141,6 тонн.

У процесі розчинення скрапу йде поглинання тепла з таким же, як у металевому ломі, тепловідводом у діапазоні 1400-1500 кДж/кг, а теплоємність його нижче, ніж у ломі. Тому, для уникнення додувок по температурі необхідно перегрівати ванну конвертера на 20-30°C, що впливає на окисленість металу й кількість розчиненого азоту в металі.

Висновки

1. При переробці металобрухту різних категорій необхідно вводити зміни у технологію плавки. Так, при переробці чушкового чавуну необхідно застосовувати вапняк у кількості 130-140 кг/т чушкового чавуну, як додатковий охолоджувач. Показано, що цей технологічний прийом скорочує кількість додувок по вуглецю і перегріву плавки. При додатковому застосуванні номограми залежності вмісту кремнію в чавуні та витрати вапна і добавкою вищезазначеної кількості вапняку плавка виходить на задану температуру у 85% плавок, що збільшує вихід придатного металу.

2. При переробці скрапу виявлена чітка залежність кількості скрапу та температури на першій повалці. Із усіх оброблених даних впливає, що при переробці скрапу необхідна добавка теплоносіїв, зокрема меленого коксика, у кількості 120 кг/т скрапу. В такому випадку, при дотриманні всіх технологічних режимів, плавка виходить на температуру 1610°C та заданий вміст вуглецю. Додавання коксика приводить до 75% зливів з однієї повалки.

3. Найбільш непрогнозованим елементом киснево-конвертерної плавки через високі коливання хімічного складу є «козловий» лом, котрий становить 8% від усієї маси плавок. Так, у деяких випадках вміст вуглецю в ньому може коливатись у діапазоні 3-5%, а сам скрап може мати кілька шарів з різним хімічним складом. Найдоцільнішим шляхом вирішення цієї проблеми є вогневе різання для здрібнювання «козлового» скрапу. У випадку відсутності вогневого різання необхідно перегрівати метал на 20-30°C.

Перелік використаних джерел:

1. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков [и др.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 463 с.
2. Богушевський В.С. Контроль динаміки ванни по ходу продувки як складова системи керування конвертерною плавкою / В.С. Богушевський, К.В. Єгоров // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2013. – № 1. – С. 51-56.
3. Богушевський В.С. Обезуглероживание стали как основной параметр оптимального управления ККП / В.С. Богушевский, С.Г. Мельник, С.В. Жук // Металл и литье Украины. – 2014. – № 2. – С. 14-16.

4. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки / В.С. Богушевский [и др.] // Сталь. – 2006. – № 1. – С. 18-21.
5. Совершенствование методики и разработка прикладной программы для расчета баланса кислорода конвертерной плавки / А.В. Сущенко [и др.] // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2013. – № 26. – С. 46-56. – (Серія : Технічні науки).
6. Сталеплавильне виробництво : Навчальний посібник / В.І. Баптизмаський [та інш.]. – К. : ІЗМН, 1996. – 400 с.
7. Саберзянов Т.Г. Субрегулярный вариант общей математической модели термодинамики металлургических шлаков / Т.Г. Саберзянов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2001. – № 12. – С. 53-55.
8. Сущенко А.В. Сравнительный анализ методик расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки / А.В. Сущенко, И.А. Фейерэizen. // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2013. – № 27. – С. 17-28. – (Серія : Технічні науки).

References:

1. Kolpakov S.V., Sarov R.V., Smoktii V.V. *Tehnologiya proizvodstva stali v sovremennykh konvertornykh cehah* [Steel production technology in modern converter shops]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 463 p. (Rus.)
2. Bogushevskij V.S., Yegorov K.V. Kontrol dinamiki vannii po hodiu produvki yak skladova sistemi keruvannya konverternoyu plavkoyu [Control of bath dynamics during purge as a component of converter melting control system]. *Naukovi visti Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini «Kiivs'kii politekhnichnii institut» – KPI Science News*, 2013, no. 1, pp. 51-56. (Ukr.)
3. Bogushevskij V.S., Melnik S.G., Zhuk S.V. Obezuglerozhivanie stali kak osnovnoy parametr optimalnogo upravleniya KKP [Steel decarburization as the main parameter of optimal control of oxygen-converter smelting]. *Metall i lit'e Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, 2014, no. 2, pp. 14-16. (Rus.)
4. Bogushevskij V.S., Grabovskij G.G., Mihajlov V.M. Kompyuternaya model rascheta shihtovki i produvki konverternoy plavki [Computer model for calculating the charge and purge converter smelting]. *Stal' – Steel*, 2006, no. 1, pp. 18-21. (Rus.)
5. Sushchenko A.V., Popov E.S., Sidorchuk R.S., Orlichenko M.P., Gritsenko A.S. Sovershenstvovanie metodiki i razrabotka prikladnoy programmy dlya rascheta balansa kisloroda konvertrenoj plavki [Perfection of methodology and development of the application program for calculation of balance of oxygen of the converter melting]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya : Tehnichni nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2013, no. 26, pp. 46-56. (Rus.)
6. Baptizmskij V.I., Bojchenko B.M., Velichko O.G. *Staleplavilne virobnictvo: Navch. posibnik* [Steelmaking: textbook]. Kiev, IZMN Publ., 1996. 400 p. (Ukr.)
7. Saberzyanov T.G. Subregulyarnyj variant obshej matematicheskoy modeli termodinamiki metallurgicheskikh shlakov [Subregular version of the general mathematical model of thermodynamics of metallurgical slag]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2001, no. 12, pp. 53-55. (Rus.)
8. Sushchenko A.V., Fejerejzen I.A. Sravnitelnyj analiz metodik rascheta materialnogo i teplovogo balansov kislorodno-konverternoy plavki [Comparative analysis of methods for calculation of material and thermal balances of oxygen-converter melting]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya : Tehnichni nauki – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, 2013, no. 27, pp. 17-28. (Rus.)

Рецензент: О.Д. Учитель
д-р техн. наук, проф., КМІ НметАУ

Стаття надійшла 15.02.2020