

## МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.184

DOI 10.31319/2519-2884.37.2020.1

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор\*  
ЛОБАНОВ Ю.С., аспірант\*  
СЕМІРЯГІН С.В., к.т.н., доцент\*\*  
ПОХВАЛТІЙ А.А., к.т.н.\*

\*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське  
\*\*ТОВ «Метінвест Політехніка»

### МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛОБРУХТУ РІЗНОЇ ЩІЛЬНОСТІ У КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНІЙ ПЛАВЦІ

**Вступ.** До сучасних напрямків підвищення енергоефективності киснево-конвертерного процесу можна віднести зменшення частки переробного чавуну у металошихті з відповідним збільшенням частки металобрухту. До 95% енерговитрат конвертерної плавки складають приховані енерговитрати, з основною статтею у енергоемності (85-91% від загальних витрат) внеску переробного чавуну (23,8-28,6 ГДж/т). Згідно з розрахунками [1] збільшення частки металобрухту у шихті кисневих конверторів, в залежності від його виду та хімічного складу [2] на кожні 10% супроводжується зменшенням енергоемності сталі, у середньому, на 1,9 ГДж/т. Коригування теплового балансу конвертерної плавки у такому варіанті забезпечують за рахунок збільшення витрат теплоносіїв, застосуванням для продувки ванни багатоконтурних та/або багатоярусних фурм [3-5], попереднього підігріву металобрухту [6], удосконалення технологічного маршруту [7] тощо.

За рахунок впровадження технології попереднього підігріву металобрухту перед заливанням переробного чавуну, безпосередньо у конвертері, як показали результати промислових плавок [6], можливо забезпечити підвищення частки останнього у металошихті з 23% до 32% (до 37% у перспективі) та зменшення витрат металошихти на 6-7 кг/т. У такому випадку здійснюється присадка кускових вуглецевмісних матеріалів на металобрухт та їх спалювання шляхом вдування газоподібного кисню з витратою 600-650 м<sup>3</sup>/хв. крізь 5-ть або 6-ть сопел штатної кисневої фурми.

У свою чергу якість (забрудненість нешкідливими та неметалічними домішками) [2] та щільність металобрухту суттєво впливає як на динаміку його підігріву, так і плавлення у конвертерній ванні. Вплив розподілу металобрухту за щільністю у металошихті на хід конвертерної плавки (окиснення домішок чавуну, шлакоутворення, розвиток тепло- й масообміну у ванні) проявляється, в основному, через вплив його на температурний режим плавки та гідродинаміку ванни [3].

**Постановка задачі.** Згідно висновків Баптизманського В.І. [8] щільність металобрухту більш сильно впливає на температуру металеві ванни перед продуванням, ніж його частка у металошихті. Зниження температури ванни в період заливання чавуну й витримки його перед продуванням киснем становить: при переробці підвищених мас металобрухту – 50-60 °С, при роботі з використанням переважно великовагового брухту (> 40% у шихті) – 40-50 °С та 80-120 °С при завалці великої кількості легковагового брухту (> 75% у шихті). На плавках зі звичайною витратою металобрухту зниження температури в цей період становить відповідно 40-70 °С у залежності від розподілу металобрухту за щільністю в завалці. За даними [9] зниження температури рідкого

чавуну до початку продувки становить 20-60 °С при використанні великовагового й 130-200 °С для легковагового металобрухту.

Процесу розплавлення металобрухту у ванні кисневого конвертера притаманні особливості розчинення твердого тіла у залізовуглецевому розплаві. У процесі нагрівання металобрухту його температура досягає точки плавлення, починається поступове оплавлення. При продувці киснем різниця температур рідкого металу й плавлення металобрухту зростає, що сприяє інтенсифікації процесу розчинення останнього.

У свою чергу, зміна концентрації вуглецю в розплаві залежить як від швидкості його окиснення, так і від швидкості плавлення металобрухту. При концентрації  $[C] > 0,1-0,3\%$  плавлення брухту підвищує швидкість зменшення  $[C]$ , а при  $[C] < 0,1-0,3\%$  – плавлення металобрухту можна порівняти зі швидкістю знеуглецювання [8, 10]. Зазвичай спостерігається перший випадок, тому що плавлення металобрухту, при нормальному ході конвертерного процесу, закінчується при вмісті вуглецю у ванні більшому ніж 0,1-0,3%.

На кривій зміни маси рідкого розплаву умовно виділяють три ділянки [10]: зниження маси в результаті намерзання кірки рідкого чавуну на поверхні металобрухту; збільшення маси з постійною швидкістю й практично незмінна маса металевого розплаву по закінченню плавлення металобрухту.

Визначення впливу щільності металобрухту, в умовах збільшення його частки у металошихті з врахуванням зміни вмісту вуглецю по ходу плавки, на температурний режим та вихід з конвертера рідкого металу залишається актуальним завданням.

**Результати роботи.** На початковому етапі заливання рідкого чавуну відбувається практично всебічне омивання кусків металобрухту розплавом, на наступних – тільки з одного боку (зверху). Частина металобрухту розчиняється вже по ходу заливання чавуну. Після розчинення кірки на поверхні металобрухту, в процесі його прогрівання, відбувається дифузія вуглецю чавуну на поверхню брухту. У результаті науглецювання відбувається зниження температури плавлення шарів металобрухту, що прилягають до поверхні кусків та їхнє оплавлення. У цей період розчиняється 40-45% від загальної кількості металобрухту при середній лінійній швидкості розчинення, за різними даними, від 2-х до 3-х мм/хв. Останній період плавлення характеризується тим, що куски металобрухту добре прогріті й градієнт температури по їхньому перетину наближений до нуля. У цей період швидкість плавлення брухту зростає до 13-15 мм/хв.

З точки зору організації раціональної конвертерної технології увесь металобрухт повинен розчинитися до того моменту, коли до кінця продувки ванни залишається ~20% від загальної тривалості продувки. При математичному описі процесу плавлення металобрухту з коефіцієнтом форми  $\lambda$  зазвичай приймають, що швидкість процесу пропорційна реакційно-активній площі  $S$  поверхні металобрухту:

$$\frac{dG}{d\tau} = kS, \quad (1)$$

де  $G$  – маса брухту, т;  $k$  – константа швидкості;  $S = \lambda \left( \frac{G}{\rho} \right)^{2/3}$ ;  $\rho$  – насипна щільність.

Однак  $\lambda$  по ходу плавлення брухту змінюється у 2-3 рази, що робить такий підхід до визначення  $S$  не зовсім коректним. З іншого боку, за результатами експериментів [11, 12] підтверджено, що металобрухт може плавитися як плита послідовно (пошарово).

На першому етапі досліджень був виконаний опис плавлення металобрухту за лінійною залежністю. В основу розробленої моделі плавлення металобрухту покладено припущення Д.А. Франк-Каменецького [13], що в граничній області турбулентності масоперенос не залежить від молекулярних констант й визначається тільки характеристиками потоку. Після оплавлення кірки чавуну на поверхні металобрухту встановлю-

ється температура ліквідусу розплаву ( $t$ ) й концентрація вуглецю ( $C_S$ ), що відповідають лінії солідусу при цій температурі. Зменшення концентрації вуглецю в розплаві при продуванні ванни киснем призводить до підвищення  $t$  й зменшення  $C_S$ . Після вирівнювання  $C_S$  із концентрацією вуглецю у металобрухті ( $C_M$ ) настає тепловий період плавлення.

Концентрація  $C_S$  у поверхневому шарі металобрухту визначається зі співвідношення

$$C_S = 0,46 \cdot C_P, \quad (2)$$

де  $C_P$  – залежить від режиму плавки й визначається при рішенні завдання зневуглецювання розплаву.

У даній моделі використано залежність, отриману за результатами експериментальних досліджень [12]

$$C_P = 0,038 + 0,013 \cdot \theta - 0,0495 \cdot \theta^2, \quad (3)$$

де  $\theta = (\tau - \tau_{\text{ПОЧ}}) / (\tau_{\text{КІН}} - \tau_{\text{ПОЧ}})$  – безрозмірний час;  $\tau$ ,  $\tau_{\text{ПОЧ}}$ ,  $\tau_{\text{КІН}}$  – поточний, початковий і кінцевий час процесу плавлення, хв.

Температура плавлення металобрухту визначається з лінійного рівняння, що відповідає діаграмі залізо-вуглець, яка, у свою чергу, встановлює зв'язок вмісту вуглецю у ванні  $[C]$  з температурою плавлення брухту  $t$ :

$$t = 1130 + 95 \cdot (4,25 - [C]). \quad (4)$$

Для спрощення розрахунку прийнято, що все тепло, що надійшло до металобрухту, витрачається на його плавлення. Загальна кількість металобрухту, що розплавився на даний момент продувки ванни, розраховується з застосуванням наступного алгоритму.

Поточна маса твердого металобрухту у рідкій ванні  $M_{\text{ТВ}}$  визначається як

$$M_{\text{ТВ}} = M_{\text{НЛ}} - \Sigma m, \quad (5)$$

де  $M_{\text{НЛ}}$  – кількість твердого брухту у конвертерній металошихті

$$m = M_{\text{НЛ}} \cdot \theta_{\text{Л}}, \quad (6)$$

де  $\theta_{\text{Л}}$  – відносний час повного розплавлення металобрухту;  $m$  – маса  $i$ -го виду металобрухту у металошихті.

На рис.1 представлені результати моделювання впливу щільності металобрухту на поточну температуру конвертерної ванни до моменту його повного розплавлення, проведеного з використанням рівнянь (2-6). Вихідні умови для розрахунку прийняті наступними: температура переробного чавуну перед заливанням у конвертер 1400 °С, частка металобрухту у металошихті конвертерної плавки 10% (рис.1, а) та 32% (рис.1, б).

Згідно з наведеним результатами (рис.1) зміна площі поверхні металобрухту, яка є функцією щільності останнього, призводить до відповідної зміни динаміки його плавлення. До найбільш суттєвого зниження температури ванни призводить використання у металошихті легковагового металобрухту.

Збільшення маси металобрухту у металошихті до 40% також суттєво змінює вигляд як кривих окиснення вуглецю, так і динаміку температури ванни у початковий період плавки. Останнє, напевне, пов'язано зі збереженням активної площі поверхні металобрухту при зміні його маси. Додаткові витрати теплоти на розплавлення збільшеної кількості попередньо не підігрітого («холодного») металобрухту призводять до зменшення температури рідкої ванни, що свідчить на користь застосування технології плавки з попереднім підігрівом збільшеної кількості брухту. У протилежному випадку нестачу теплоти буде компенсовано окисненням заліза та пов'язаним з цим зростанням окисненості шлаку.

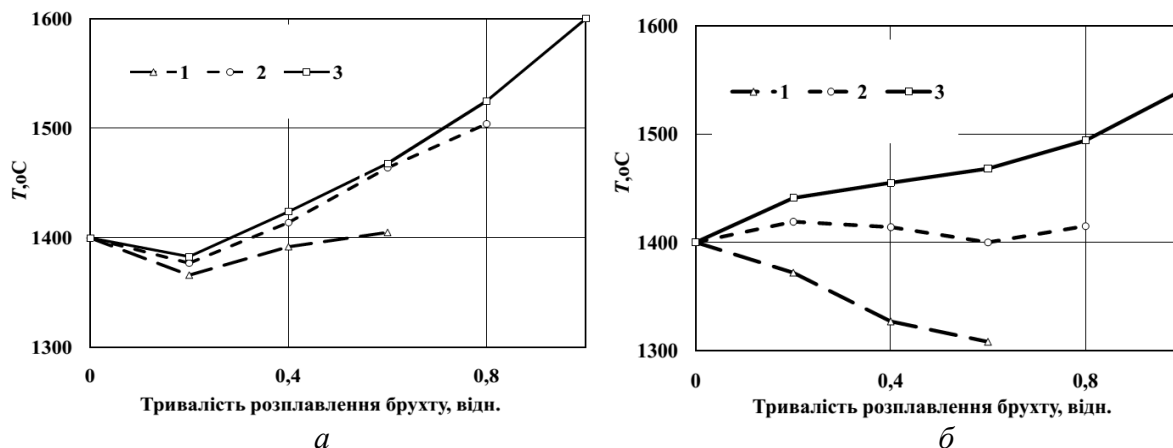


Рисунок 1 – Розрахункова зміна температури металевої ванни до моменту повного розплавлення металобрухту різної щільності: 1 – легковаговий металобрухт; 2 – пакетований; 3 – великоваговий. Частка металобрухту у металошихті: а – 10%; б – 40%

З метою більш точного опису процесу розплавлення металобрухту, на основі застосування результатів попередніх чисельних експериментів [14] і з врахуванням даних промислових плавок, запропоновані математичні вирази для опису плавлення металобрухту різної щільності у вигляді поліномів 4-го ступеня:

для великовагового брухту

$$M_{\text{ПЛ}}(\tau) = -15,6 + 4,41\tau - 0,21\tau^2 + 0,0042\tau^3 - 0,00002\tau^4, \quad (7)$$

для легковагового брухту

$$M_{\text{ПЛ}}(\tau) = 9,6 + 4,52\tau - 0,057\tau^2 - 0,0018\tau^3 + 0,00005\tau^4, \quad (8)$$

для пакетованого металобрухту, брикетів зі сталевих стружки

$$M_{\text{ПЛ}}(\tau) = 4,2 - 0,022\tau + 0,038\tau^2 + 0,00016\tau^3 - 0,000004\tau^4, \quad (9)$$

де  $\tau$  – тривалість процесу.

По ходу плавлення металобрухту відбувається закономірне зниження концентрації вуглецю в об'ємі металевої ванни

$$[C]_{\tau} = \frac{[C]_{\text{ЗАЛ}}}{M_{\text{ЧАВ}}(\tau) + \sum M_{\text{ПЛ}}}, \quad (10)$$

де  $[C]_{\text{ЗАЛ}} = [C]_0 - [C]_{\text{ВИД}}$  – залишок вуглецю в об'ємі ванни, %;  $[C]_0$  – вміст вуглецю в

розплаві до початку продувки ванни, %;  $[C]_{\text{ВИД}} = \int_0^{\tau} [C] d\tau$  – кількість видаленого по

ходу продувки ванни киснем вуглецю, %;  $M_{\text{ПЛ}}$  – кількість розплавленого металобрухту, кг;  $M_{\text{ЧАВ}}(\tau) = M_{\text{НЧ}} - [\text{Si}]_{\text{Ч}}(\tau) - [\text{Mn}]_{\text{Ч}}(\tau) - [\text{C}]_{\text{Ч}}(\tau) - [\text{P}]_{\text{Ч}}(\tau)$  – зміна маси рідкого переробного чавуну;  $M_{\text{НЧ}}$  – кількість рідкого переробного чавуну у металошихті, кг;  $[\text{Si}]_{\text{Ч}}(\tau)$ ,  $[\text{Mn}]_{\text{Ч}}(\tau)$ ,  $[\text{C}]_{\text{Ч}}(\tau)$ ,  $[\text{P}]_{\text{Ч}}(\tau)$  – поточна концентрація домішок у рідкому чавуні.

Зміна маси рідкої ванни по ходу конвертерної плавки визначається за виразом

$$M_M = M_{\text{ЧАВ}}(\tau) - \sum M_{\text{ПЛ}}, \quad (11)$$

де  $\sum M_{\text{ПЛ}}$  – загальна маса розплавленого металобрухту на момент часу  $\tau$ .

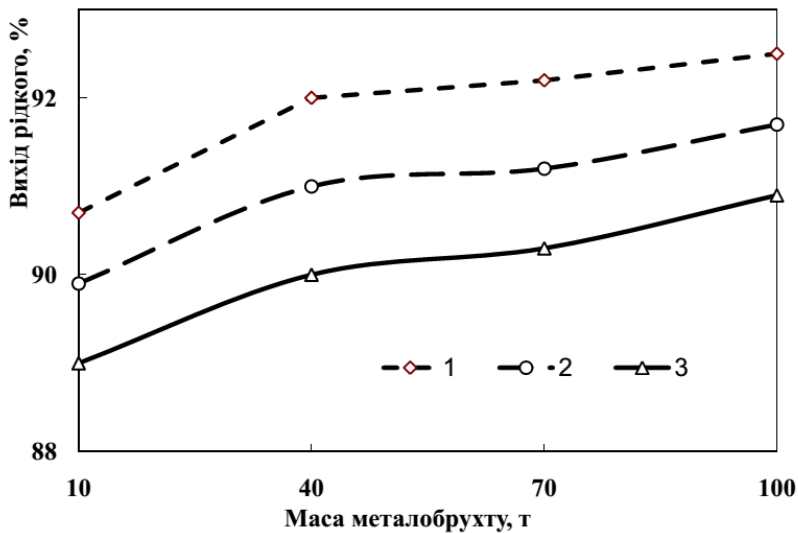


Рисунок 2 – Вплив маси металобрухту у металошихті 250-т конвертера на вихід рідкого металу при різній щільності брухту: 1 – великоваговий металобрухт; 2 – пакетований; 3 –

Виконано чисельне моделювання динаміки плавлення «холодного» металобрухту у 250-т конвертері КЦ ПАТ «Дніпровський меткомбінат» з використанням виразів (7-11). Вплив ваги металобрухту у металошихті при різній його щільності, на вихід рідкого металу, наведено на рис.2.

Підвищення виходу рідкого металу при збільшенні частки великовагового металобрухту у металошихті, у порівнянні з легковаговим (рис.2), можна пояснити підвищеним вмістом заліза в початковий період продувки внаслідок переохолодження ванни та винесенням заліза у зв'язку із особливостями процесу

шлакоутворення на початковій стадії плавки при використанні легковагового брухту.

Досліджено також вплив щільності металобрухту на вміст оксидів заліза в шлаку та температурний режим процесу. При використанні великовагового металобрухту окисненість шлаку у початковий період плавки дещо знижується, температура ванни зростає. Використання легковагового металобрухту призводить до різких стрибків температури ванни, зменшенню швидкості окиснення вуглецю та прискоренню підвищення окисненості шлаку. По мірі зменшення кількості розчиненого у ванні вуглецю та маси брухту, що не розплавився, температурні криві наближуються одна до одної.

Динаміка окиснення вуглецю при використанні легковагового металобрухту, у порівнянні з великоваговим, змінюється незначно з наступних причин. З одного боку зростання реакційно-активної поверхні брухту призводить до зниження концентрації вуглецю за рахунок розбавлення розплаву, а з іншої – до зменшення швидкості окиснення вуглецю при зниженні температури ванни.

Результати розрахунків з використанням запропонованої моделі свідчать про можливість максимізації виходу рідкого металу, в умовах використання «холодного» металобрухту при його кількості до 22% від загальної маси металошихти.

**Висновки.** Запропоновані математичні вирази для опису плавлення металобрухту у конвертерній плавці за лінійною залежністю та з використанням поліномів 4-го ступеня, у яких врахований вплив зміни концентрації вуглецю у ванні. Досліджений вплив щільності та частки металобрухту, що входить до складу металошихти, на тривалість його розплавлення у ванні кисневого конвертера і вихід рідкого металу. Визначений вплив щільності металобрухту на вміст оксидів заліза в шлаку та температурний режим процесу. З точки зору забезпечення раціонального ходу плавки доцільним є використання рівних часток великовагового та легковагового металобрухту в незалежності від частки останнього у металошихті конвертерної плавки. У разі використання, у

розглянутих умовах, «холодного» металобрухту максимізація виходу рідкого металу забезпечується при кількості брухту до 22% від загальної маси металошихти.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сігарьов Є.М., Лобанов Ю.С. *Енергоефективність конвертерного процесу із заміниками сталевих брухту у шихті*. Monografia pokonferencyjna «SCIENCE, RESEARCH, DEVELOPMENT. №32», Berlin, 30-31 серпня 2020 р. Warszawa: Sp.z.o. «Diamond trading tour», 2020. С. 48-61.
2. Сігарьов Є.М., Полетаєв В.П., Вовк О.А. Удосконалення методики визначення металургійної цінності окускованих відходів. *Зб. наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2019. Вип. 1 (34). С. 15-23.
3. Чернятевич И.В., Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г. Современное состояние и направления совершенствования конструкций кислородных фурм для продувки конвертер-ной ванны. *ОАО Черметинформация. Бюллетень «Черная металлургия»*. Москва. 2008. № 12. С. 23-27.
4. Разработка конструкции двухъярусной фурмы и режима продувки ванны 160-т кон-вертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с ее использованием / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, И.В. Чернятевич и др. / *Теория и практика металлургии*. 2012. № 5-6. С. 76-85.
5. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Новые разработки конструкций ки-слородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМит-тал Кривой Рог». *Теория и практика металлургии*. 2009. № 2. С. 31-38.
6. Сігарьов Є.М., Лобанов Ю.С., Полетаєв В.П. Вплив якості металобрухту при його попередньому підігріві на енергоефективність конвертерної плавки. *Зб. наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське, 2020. Вип. 1 (36). С. 21-27.
7. Сигарев Е.Н., Недбайло Н.Н., Гуржий Д.О. Энергосберегающий технологический маршрут выплавки стали для ПАО «ДМКД». *Зб. наукових праць Дніпродзержинсько-го технічного університету: (технічні науки)*. Кам'янське, 2015. Вип. 1 (26). С. 3-10.
8. Баптизманский В.И., Бойченко Б.М., Третьяков Е.В. Металлолом в шихте кислородных конвертеров. Москва : Металлургия, 1982. 136 с.
9. Brotzmann K. Progress in increasing scrap rates in converted steelmaking. *Iron and Steelmaking*. 1980. V. 7. № 5. P. 249-252.
10. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: тео-рия, технология, качество стали, конструкция агрегатов, рециркуляция материалов и эко-логия: учебник. Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. 454 с.
11. *Техника высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны*. А.Г. Чернятевич, А.С. Бродский, Е.Н. Сигарев и др. : Труды восьмого конгресса сталепла-вильщиков, г. Нижний Тагил, 18-22 октября, 2004 г. Москва : ОАО «Черметинформация», 2005. С. 175-180.
12. Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Селищев В. Н. Исследование температурной неоднород-ности конвертерной ванны. *Системні технології*. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2001. № 1(12). С. 81-85.
13. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Москва : Наука, 1987. 502 с.
14. Математическая модель обезуглероживания в ванне кислородного конвертера / Е.Н. Сигарев, Ю.Н. Яковлев, Л.М. Учитель и др. *Известия вузов. Черная металлур-гия*. 1991. № 12. С. 64-67.

Надійшла до редколегії 30.10.2020