

DOI: 10.31319/2519-2884.38.2021.4

УДК 669.184

Є.М. Сігарьов, д.т.н., професор, en_sigarev@ua.fm

Ю.С. Лобанов, аспірант

А.А. Похвалітій, к.т.н., доцент, artemmslp@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ НАКОНЕЧНИКА ФУРМИ НА ПОКАЗНИКИ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ З ПОПЕРЕДНІМ ПІДГРІВОМ МЕТАЛОБРУХТУ

В роботі вирішена актуальна наукова задача, яка полягає в науковому обґрунтуванні напрямків удосконалення конструкції наконечника кисневої фурми зі встановленням зв'язку між конструктивними та технологічними параметрами останнього та показниками конвертерної плавки. Метою роботи є розробка науково-обґрунтованих рекомендацій щодо методики розрахунку конструкції наконечника, раціональних дуттьових режимів попереднього підігріву металобрухту, продувки ванни та встановлення їх впливу на окисненість конвертерної ванни й шлаку та динаміку руйнування футерівки конвертера. Отримано залежності параметрів реакційної зони взаємодії кисневих струменів з конвертерною ванною при зміні кутів нахилу сопел та висоти розташування наконечника.

Ключові слова: конвертер; фурма; наконечник; брухт; підігрів; сталь; кисень.

The actual scientific problem is solved in the work, which consists in scientific substantiation of directions of improvement of a design of a tip of an oxygen lance with establishment of communication between constructive and technological parameters of the last and indicators of converter melting. The aim of the work is to develop scientifically substantiated recommendations on the method of calculating the tip design, rational blast modes of preheating scrap metal, bath purge and establishing their effect on the oxidation of the converter bath and slag and the dynamics of destruction of the converter lining. The dependences of the parameters of the reaction zone of the interaction of oxygen jets with the converter bath when changing the angles of the nozzles and the height of the tip are obtained.

Keywords: converter; lance; tip; scrap; heating; steel; oxygen.

Постановка проблеми

Впроваджена на 250-т конвертерах конвертерного цеху ПАТ «ДМК» технологія ведення плавки з коригуванням теплового балансу за рахунок попереднього підігріву підвищеної кількості металобрухту безпосередньо в конвертері має ряд недоліків. До останніх можна віднести: збільшення загальної тривалості циклу плавки на 4—7 хв. при одночасному підвищенні інтенсивності руйнування футерівки агрегату [1, 2]; підвищення витрат дуттьового кисню, електроенергії й твердого теплоносія; складність забезпечення рівномірного нагрівання металобрухту та т. ін.

Вказані недоліки, в основному, обумовлені як нестабільністю хімічного складу металошихти, температури переробного чавуну, так і непристосованістю штатних наконечників кисневої фурми для забезпечення попереднього підігріву металобрухту [3]. Так, нагрівання металобрухту забезпечується за рахунок спалювання присадженого вугілля кисневими струменями, що вдувають крізь сопла Лавалля, розташовані під кутом $17^{\pm 30}$ град до вертикальної осі фурми, наконечників штатних 5-ти та 6-ти соплових фурм. Як при попередньому нагріванні брухту, так і у випадку продувки ванни у режимі «повного допалювання» відхідних газів у робочому просторі агрегату негативний вплив кисню, невикористаного на вугілля та домішки розплаву, на периклазовуглецеві вогнетриви футерівки, суттєво зростає.

Актуальним завданням залишається наукове обґрунтування раціонального дуттьового режиму та удосконалення конструкції наконечника фурми шляхом зміни розмірів та кута нахилу сопел Лавалля із забезпеченням зниження теплового навантаження на футерівку, інтенсивно-

сті її руйнування та зменшення окисненості шлаку, особливо в умовах прийнятої практики «переду» розплаву до вмісту 0,03—0,04 % С. Актуальність модернізації наконечника пов'язана з кінетичними особливостями гетерогенних процесів [4], необхідністю збільшення ступеня використання кисню на окиснення домішок переробного чавуну, особливо при попередньому ковшовому рафінуванні останнього [5], зниження окисненості сталі наприкінці продувки конвертерної ванни та забезпечення ефективності операції захисту футерівки за рахунок нанесення кінцевого шлаку на її поверхню [6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Як відомо [4], оксиди заліза, що утворюються в реакційній зоні, служать «посередником» у передачі кисню від дуття до домішок розплаву, а в шлаках — активним розчинником вапна. Розташування реакційної зони у робочому просторі конвертера й зміна її геометричних параметрів, з одного боку, дозволяють деякою мірою управляти процесами окисного рафінування, з іншого — визначати ступінь впливу високотемпературних факелів на футерівку агрегату. Безпосередньо зв'язаний зі ступенем розвитку міжфазної поверхні у конвертерній ванні й другий критерій оптимізації — глибина впровадження струменя кисню в рідкий метал.

При проектуванні конструкції наконечника кисневої фурми необхідно враховувати також зміну глибини й площі конвертерної ванни по ходу кампанії агрегату по футерівці. При цьому відбуваються зміни як у структурі реакційних зон, так і у характері взаємодії кисневих струменів з розплавом.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка науково-обґрунтованих рекомендацій щодо методики розрахунку конструкції наконечника, раціональних дуттьових режимів попереднього підігріву металобрухту, продувки ванни та встановлення їх впливу на окисненість конвертерної ванни й шлаку та динаміку руйнування футерівки конвертера.

Виклад основного матеріалу

До початку проведення досліджень у конвертерному цеху ПАТ «ДМК» для підігріву металобрухту та продувки ванни використовували як 5-ти й 6-ти соплові зварні наконечники власного виробництва, так і наконечники фірми «Saar Metall» (Німеччина) з кутами нахилу сопел Лавалля $17^{\pm 30}$ град.

При коливаннях маси металошихти від 260 до 285 т частку металобрухту в шихті змінювали в межах від 27 до 32—34 % (з використанням технології попереднього підігріву брухту безпосередньо в конвертері перед заливанням чавуну). У різні періоди кампанії 250-т конвертерів по футерівці у якості металодобавки використовували привізний металобрухт, твердий чавун, чавунний скрап, конвертерний шлак, агломерат, МОСЗ, брикетовану сталеву стружку й т. ін.

Хімічний склад й температура переробного чавуну, що заливали в конвертер, також відрізнялися нестабільністю й відхиленнями від вимог ТІ 230-С320 «Виплавка конвертерної сталі». Коливання у переробному чавуні вмісту Si (0,36—1,04 %), Mn (0,05—0,14 %), S (0,014—0,063 %) та температури чавуну (1241—1329 °С), не сприяли стандартизації умов ведення плавки й призводили до невиправданого зменшення виходу рідкого, пере окиснення шлаку та металевого розплаву на випуску, інтенсифікації руйнування футерівки.

Необхідність модернізації наконечників штатних фурм конвертерного цеху обумовлена, крім того, визначеною авторами цієї роботи невідповідністю геометричних параметрів сопел Лавалля розрахунковим значенням та умовам ведення плавки, з врахуванням отриманого досвіду розробки й застосування різних конструкцій наконечників на промислових підприємствах України й зарубіжжя.

Розрахунки параметрів наконечника фурми проведені з застосуванням методик проф. Чернятевича А.Г. [7]: класичній, коли максимальний імпульс кисневого струменя можна отримати з врахуванням того, що кисень по довжині сопла розширюється від початкового до тиску навколишнього середовища (розрахунковий режим) та за методикою, що передбачає розрахунки розмірів укороченого сопла. В останньому випадку критичний діаметр ($d_{кр}$) сопла Лавалля визначається по максимальному тискові кисню $P_{O_2}^{max}$, а вихідний діаметр ($d_{вих}$) — за величи-

ною $P_{O_2}^{\min}$, щоб уникнути відриву струменя й утворення вихрових зон у стінок сопла й тим самим запобігти зношуванню кромки останнього. Конфігурація та розміри сопел, отримані з використанням методик розрахункового й укороченого сопел Лавалю, представлені на рис. 1.

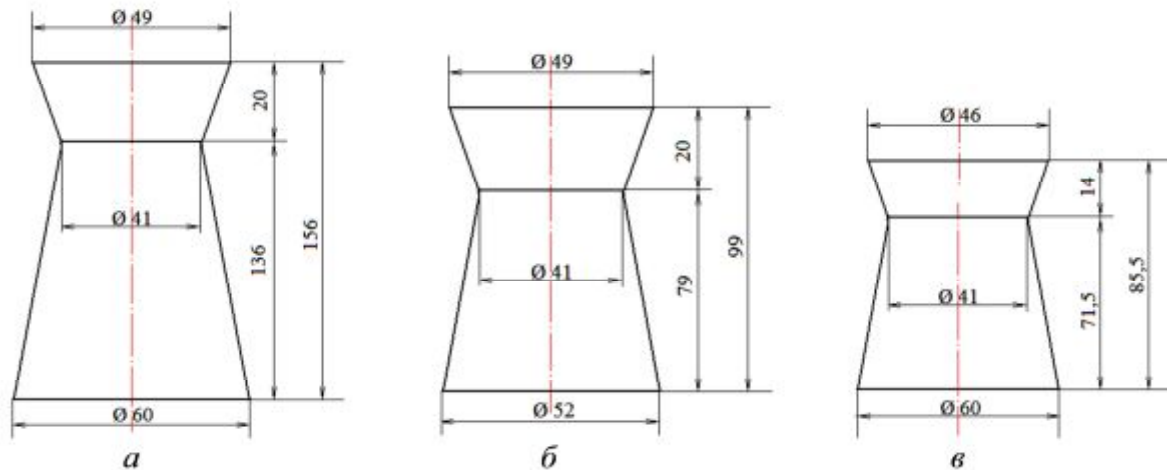


Рис. 1. Профіль сопел Лавалю для 5-ти соплового наконечника: а) розрахунковий; б) укорочений; в) сопло, що використовують у штатному наконечнику конвертерного цеху

Для розробки раціонального дуттьового режиму конвертерної плавки з використанням наконечників запропонованої конструкції (з кутом нахилу сопел Лавалю до осі фурми в межах $14^{\pm 30}$ — $15^{\pm 30}$ град) важливо одержати уявлення про вплив зміни положення фурми (h_{Φ}) на діаметр реакційної зони. Такі дані є необхідними також для попередньої оцінки можливого впливу кисневих струменів на руйнування футерівки.

Визначаємо геометричні параметри зони контакту «кисневий струмінь — конвертерна ванна» (у першому наближенні відсутності впливу режиму витoku струменя).

З врахуванням еліптичності плями контакту струменя з ванною визначаємо малу вісь a :

$$a = 2 \cdot \frac{h_{\Phi} + 0,125 \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha)}{\cos \alpha} \cdot \operatorname{tg} \beta$$

та велику вісь еліпсу b :

$$b = (h_{\Phi} + 0,125 \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha)) \cdot (\operatorname{tg}(\alpha + \beta) - \operatorname{tg}(\alpha - \beta)).$$

Визначаємо сумарну площу області контакту струменів (S) з поверхнею ванни конвертера для 5-ти соплового наконечника з використанням наступного виразу:

$$S = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{4} \cdot n, \text{ де } n \text{ — кількість сопел у наконечнику фурми, шт.}$$

Підставивши значення осей a і b , одержимо:

$$S = \frac{\pi \cdot n \cdot (h_{\Phi} + 125 \cdot \operatorname{tg}(90 - \alpha))^2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (\operatorname{tg}(\alpha + \beta) - \operatorname{tg}(\alpha - \beta))}{2 \cdot \cos \alpha}.$$

Результати розрахунків площі поверхонь реакційних зон для запропонованої й штатної конструкції 5-ти соплового наконечника представлені в табл. 1 і схематично на рис. 2.

Дослідно-промислові випробування розробленої конструкції 5-ти соплового наконечника на 250-т конвертерах ПАТ «ДМК» було проведено у різні періоди кампанії агрегатів по футерівці: на початку кампанії (після 90 плавки по футерівці) та у першій її половині (після 700 плавки), що дозволило порівняти можливості управління дуттьовим режимом й характер шлакоутворення. З врахуванням відмінних вихідних параметрів робочого простору агрегату у вказані періоди отримали відомості щодо впливу зміни конструкції наконечника на окисненість шлаку (рис. 3), інтенсивність зносу футерівки, вихід рідкого металу та т. ін.

Таблиця 1. Параметри реакційних зон для штатної й запропонованої конструкції 5-ти соплових наконечників при різних положеннях фурми

Висота фурми над рівнем ванни, h_f , м	Площа зони контакту струменя із одного сопла з ванною, A , м ²		Загальна площа реакційної зони, S , м ²		Діаметр реакційної зони, d_p , м	
	дослідн.	штатн.	дослідн.	штатн.	дослідн.	штатн.
0,8	0,027	0,104	0,136	0,518	0,871	1,126
1	0,037	0,141	0,183	0,703	1,009	1,312
1,2	0,047	0,183	0,236	0,917	1,146	1,499
1,4	0,059	0,232	0,296	1,160	1,284	1,685
1,6	0,073	0,286	0,363	1,431	1,421	1,872
1,8	0,087	0,346	0,437	1,730	1,559	2,058
2	0,103	0,411	0,517	2,057	1,697	2,244
2,2	0,121	0,483	0,605	2,413	1,834	2,431
2,4	0,140	0,560	0,699	2,798	1,972	2,617
2,6	0,160	0,642	0,800	3,210	2,110	2,804
2,8	0,182	0,730	0,908	3,651	2,247	2,990
3	0,204	0,824	1,022	4,121	2,385	3,176
3,2	0,229	0,924	1,143	4,619	2,523	3,363
3,4	0,254	1,029	1,272	5,145	2,660	3,549
3,6	0,281	1,140	1,407	5,700	2,798	3,736
3,8	0,310	1,257	1,549	6,283	2,936	3,922
4	0,339	1,379	1,697	6,894	3,073	4,109

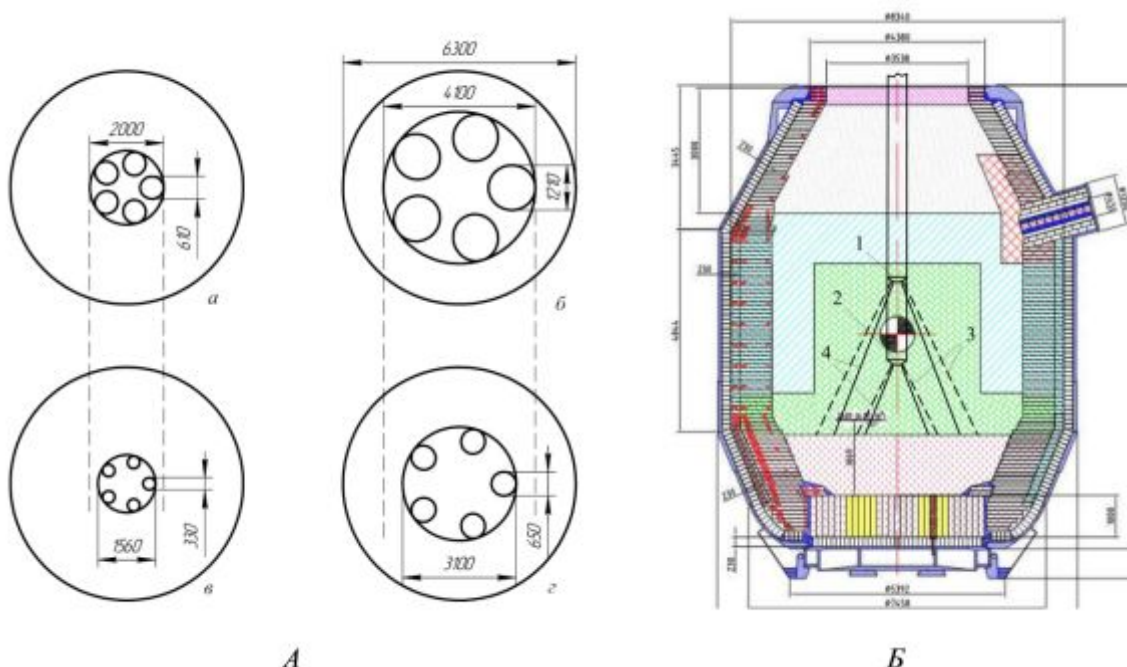


Рис. 2. А) Схема та параметри області контакту кисневих струменів з поверхнею конвертерної ванни для 5-ти соплового штатного ($\alpha = 17^{\pm 30}$ град) (а, б) та дослідного ($\alpha = 15^{\pm 30}$ град) (в, г) наконечника при висоті фурми над рівнем ванни 1,8 і 4 м відповідно; Б) Схематичне зображення розташування умовних зовнішніх границь зон контакту кисневих струменів з поверхнею ванни при різній висоті фурми, оснащеної 5-ти сопловими наконечниками: 1, 2 — висота фурми над рівнем ванни 4 і 1,8 м відповідно; 3, 4 — зовнішні границі кисневих струменів для штатного й дослідного наконечника

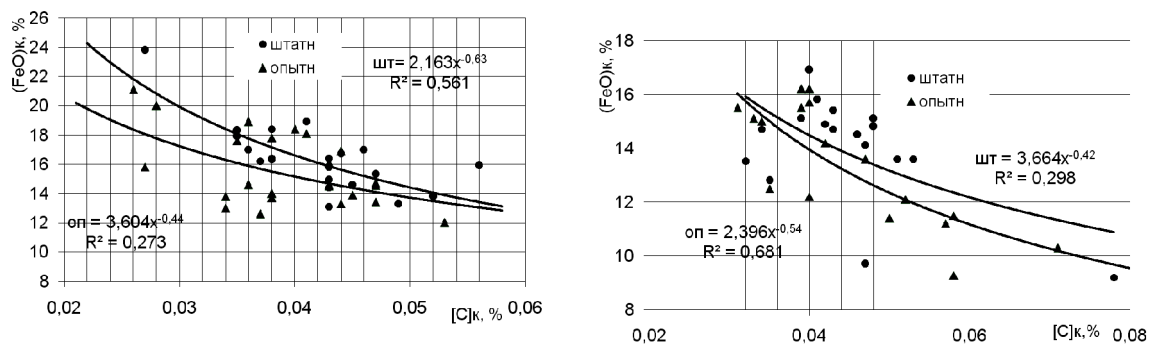


Рис. 3. Вплив зміни конструкції 5-ти соплового наконечника кисневої фурми на окисненість кінцевого конвертерного шлаку у періоді на початку (після 90 плавки по футерівці) та у першій половині кампанії (після 700 плавки) при приблизно подібних параметрах переробного чавуну

Необхідно відмітити, що при поліпшенні умов для попереднього підігріву металобрухту при використанні запропонованого наконечника, зниженні інтенсивності зносу футерівки, заметалення стовбура фурми з дослідним наконечником було незначним у порівнянні зі штатним. Зняття фурми на обрізку настилів в дослідний період не проводили. На рис. 4 представлено запропонований дугтьовий режим для періоду попереднього підігріву металобрухту у 250-т конвертері з використанням розробленої конструкції 5-ти соплового наконечника.

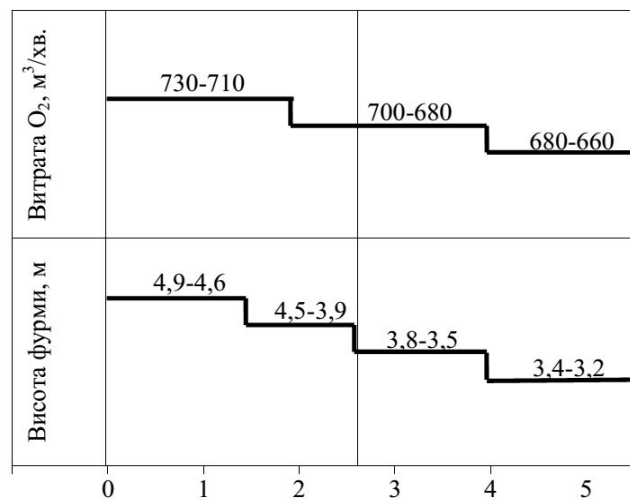


Рис. 4. Запропонований дугтьовий режим для періоду попереднього підігріву металобрухту у 250-т конвертері з використанням розробленої конструкції 5-ти соплового наконечника

За результатами аналізу отриманих у ході випробування наконечників даних встановлена можливість ведення плавки з підвищеним, у порівнянні зі штатним наконечником, положенням 5-ти соплового дослідного наконечника. Це дозволило на 12—15 % прискорити наведення реакційно активного шлаку з більш раннім початком періоду інтенсивного зневуглецювання розплаву.

Висновки

Розроблено науково-обґрунтовані рекомендації щодо методики розрахунку конструкції наконечника, раціональних дугтьових режимів попереднього підігріву металобрухту, продувки ванни та встановлення їх впливу на окисненість конвертерної ванни й шлаку та динаміку руйнування футерівки конвертера.

Запропоновано методику спрощеного розрахунку та отримано залежності параметрів реакційної зони взаємодії кисневих струменів з конвертерною ванною при зміні кутів нахилу сопел та висоти розташування наконечника придатні для попередньої оцінки впливу кута впливу останніх на інтенсивність зносу футерівки.

Виконані розрахунки конструктивних і технологічних параметрів 5-ти соплових наконечників на витрату кисню 1000—700 нм³/хв. для 250-т конвертерів. Виконано проектування й виготовлення робочих креслень модернізованих наконечників. Виготовлена дослідна партія 5-ти соплових наконечників. Запропоновані та впроваджені на 250-т конвертерах дутьові режими попереднього підігріву металобрухту та ведення конвертерної плавки з використанням удосконаленого наконечника кисневої фурми зі зміною параметрів й кута нахилу сопел Лавала.

Встановлено, що використання 5-ти соплових наконечників кисневих фурм з кутом нахилу 15^{±30} град у першій половині кампанії (або до 55 % зносу футерівки) призводить до більш «жорсткого» характеру взаємодії кисневого струменя з ванною. За рахунок зміни характеристик струменя змінюється співвідношення швидкостей окиснення вуглецю й заліза, при цьому збільшується частка кисню, що витрачається на окиснювання домішок, а отже, зменшується частка кисню на окиснення заліза. Такі наконечники доцільно використовувати при підвищеній частці брухту у шихті. При зменшеній частці брухту у металошихті в цей період доцільно використовувати 5-ти соплові наконечники (з розрахунковими параметрами) з кутом нахилу 16^{±30} град.

У другій половині кампанії конвертера по футерівці при підвищеній частці брухту у металошихті доцільним є використання 6-ти соплових наконечників з кутом нахилу сопел 15^{±30}—16^{±30} град. При звичайному співвідношенні брухт — переробний чавун у металошихті доцільним є перехід до використання 6-ти соплових наконечників з кутом нахилу 16^{±30}—17^{±30} град.

Список використаної літератури

1. Chernyatevich A. G., Sigarev E. N., Protopopov E. V., Sheremet V. A., Chernyatevich I. V. and Chubin K. I. Application of slag coating to the converter lining by means of moving gas-powder jets. *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41, № 2. P. 94–98.
2. Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V., Chubin K.I., Chubina E.A. New system for applying a slag coating to the converter lining. *Steel in Translation*, 2017. Vol. 47, № 6. P. 394–398.
3. Сигарев Е.Н. Технологические аспекты производства высококачественной стали / *Металл и литье Украины*. 2005. № 3–4. С. 93–95.
4. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» / *Теория и практика металлургии*. 2010. № 1–2 (74–75). С. 31–39.
5. Sigarev E.N. Power efficiency of intensive cast iron desulfurization in a ladle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 2/1(74). P. 38–42. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40534>
6. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Sigarev E.N. Applying slag coatings to the converter lining. *Steel in Translation*, 2014. Vol. 44. № 6. P. 403–407.
7. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чубина Е.А., Руденко Р.Н. «Разработка дутьевого и шлакового режимов плавки для большегрузного конвертера». *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)* – Дніпродзержинськ: ДДТУ вип. 1(26). 2015. С. 10–19.

STUDY INFLUENCE THE DESIGN OXYGEN LANCE HEAD ON THE RESULTS OF CONVERTER MELTING WITH SCRAP PREHEATING

Sigarev E., Lobanov Y., Pohvalitiy A.

The results of calculation of energy efficiency of the variant of technology of converter smelting with preliminary heating of scrap metal in the unit due to burning of solid fuels in modern raw material conditions of the metallurgical enterprise of Ukraine are presented. A critical analysis of the variant of converter smelting technology with the use of preheating of an increased amount of scrap metal in the charge containing briquettes of steel chips in the unit, before pouring processing iron. According to the results of the calculation of the efficiency of use of different types of fuel used for preheating of scrap metal in the unit, the rational type and technology of its use in converter smelting are determined. A direct connection between the chemical composition of briquettes, the level of their preheating and the share in the metal charge on the energy efficiency of the converter process and their chemical heat content has been established. The nature of the temperature distribution in the volume of briquettes from steel shavings, which are a part of the metal charge, is taken into account when they are preheated by oxidation of coal with oxygen supplied through the nozzles of the standard lance. A method for calculating the change in energy consumption of scrap metal during its preheating, taking into account the content of elements in the briquettes and the level of heating.

The energy consumption of the converter process with preheating of the metal charge increases in proportion to the level of contamination of briquettes from steel chips with non-metallic inclusions. According to the calculations when heating briquettes by 100—800 degrees in the converter, the increase in energy consumption of the converter process is from 60 to 630 MJ / t and from 445 to 1000 MJ/t for contamination of briquettes with non-metallic inclusions of 2.47 and 7.87 % by weight in accordance. With the reduction of briquette contamination, the efficiency of preheating of the metal charge increases. The share of the impact of the level of briquette contamination on the overall energy efficiency of the converter process is on average 0.3 % of the total energy savings of 1.91—1.92 GJ / t, which is achieved by increasing the share of scrap metal in the charge.

References

- [1] Chernyatevich A. G., Sigarev E. N., Protopopov E. V., Sheremet V. A., Chernyatevich I. V. and Chubin K. I. Application of slag coating to the converter lining by means of moving gas-powder jets. *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41, № 2. P. 94–98. [in Russian].
- [2] Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V., Chubin K.I., Chubina E.A. New system for applying a slag coating to the converter lining. *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, № 6, P. 394–398. [in Russian].
- [3] Sigarev Ye.N. Tekhnologicheskiye aspekty proizvodstva vysokokachestvennoy stali / *Metall i lit'ye Ukrainy*. 2005. № 3–4. P. 93–95. [in Ukraine].
- [4] Chernyatevich A.G., Sigarev Ye.N., Chernyatevich I.V. Novyye razrabotki konstruktsiy kislorodnykh furn i sposobov produvki vannoy 160-t konverterov OAO «ArselorMittal Krivoy Rog» / *Teoriya i praktika metallurgii*. 2010. № 1–2 (74–75). P. 31–39. [in Ukraine].
- [5] Sigarev E.N. Power efficiency of intensive cast iron desulfurization in a ladle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 2/1(74). P. 38–42. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40534> [in Ukraine].
- [6] Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Sigarev E.N. Applying slag coatings to the converter lining. *Steel in Translation*, 2014, Vol. 44, №6, P. 403–407. [in Russian Federation]
- [7] Chernyatevych A.H., Syharev E.N., Chubyna E.A., Rudenko R.N. «Razrabotka dut'evoho y shlakovoho rezhymov plavky dlya bol'shehruzhnoho konvertera». *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprodzerzhyn'skoho tekhnichnoho universytetu: (tekhnichni nauky) – Dniprodzerzhyn'sk: DDTU – vyp. 1(26)*. 2015. P. 10–19. [in Ukraine].