

Г.Ю. Крячко, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова,
e-mail: krachkogennadij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>

Є.М. Сігарьов, д-р техн. наук, професор, зав. кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова,
e-mail: en_sigarev@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

До питання про вибір характеристик задувальних шихт доменних печей

Від вибору раціональних технології задувального періоду та складу задувальної шихти значною мірою залежать успішне виведення доменних печей (ДП) на проектну потужність і тривалість їх кампанії. Ключовим при виборі складу задувальних шихт є питання про визначення витрати коксу, найбільш вартісного компоненту шихт і визначального фактору для успішного пуску доменної печі. Аналіз джерел інформації свідчить про неоднозначність підходу для вирішення вказаного питання.

Метою роботи є узагальнення досвіду використання задувальних шихт доменних печей для покращення їх характеристик, пов'язаних, перш за все, із загальною і зональною витратами коксу.

Показано, що з появою досліджень структури стовпа шихти заморожених на ходу доменних печей і розуміння процесу утворення коксової насадки, змінилися підходи до формування задувальної шихти, перш за все це позначилось на об'ємах безфлюсового коксу нижніх шихт. Запропоновані нові характеристики задувальних шихт, віднесені до корисного об'єму печі $V_{кор}$, зокрема об'ємна частка коксу в загальній задувальній шихті $V_{\Sigma K}/V_{кор}$, об'ємна частка коксу, завантаженого без флюсу нульової і першої шихт $V_{Kни}/V_{кор}$, об'ємна частка коксової насадки $V_{Kн}/V_{кор}$.

Виявлено тенденцію зростання вказаних характеристик в процесі удосконалення доменної технології. Так, якщо на початку 50-х років ХХ ст. на печах об'ємом 1386 м³ індекс $V_{\Sigma K}/V_{кор}$ становив 0,66—0,72, то в 70-х роках і надалі він збільшився до 0,76—0,96. В 60-70-і роки об'єм безфлюсового коксу нижніх шихт коливався в межах 14—27 % $V_{кор}$, а у 80-90-х роках минулого століття і надалі на початку нового зріс до 33—48 %, що суттєво покращило умови утворення коксової насадки в задувальний період доменних печей.

Встановлено існування зв'язку між відносною об'ємною витратою коксу в нульову і першу безфлюсові шихти з відносним об'ємом коксової насадки, сформованої при відмінних формах структури стовпа шихти. З переходом з W-подібної форми зони когезії до Λ-подібної обидві характеристики зростали незалежно від об'єму доменних печей.

Показано, що рудне навантаження на кокс не може бути надійним критерієм задувальної шихти, оскільки не враховує додаткову витрату шлакоутворюючих компонентів.

Ключові слова: доменна піч, задувальна шихта, характеристики шихти, об'ємна частка, кокс, насадка, рудне навантаження.

Вступ. Виведення доменних печей на проектну потужність і тривалість їх кампанії багато в чому залежить від технології задування печі, в якій чільне місце відводиться вибору складу задувальної шихти. Ключовим при виборі складу задувальних шихт є питання про визначення витрати коксу, найбільш вартісного компонента шихт і визначального фактора для успішного пуску доменної печі.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Інститутом чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро) запропоновано лише дві характеристики задувальних шихт, що мають безпосереднє відношення до витрати коксу, а саме рудне навантаження на увесь об'єм задувальної шихти в межах 0,60—0,75 т/т і рудне навантаження у верхній залізгорудній шихті 2,2—2,8 т/т коксу [1]. Зважаючи на те, що головним завданням задувального періоду є

утворення технологічної зональності в стовпі шихтових матеріалів, де кокс в різних зонах є незамінною складовою, вказаних вище характеристик шихт першого заповнення явно недостатньо.

Мета і завдання/питання/гіпотези дослідження. Метою дослідження є узагальнення досвіду використання задувальних шихт доменних печей для покращення їх характеристик, пов'язаних, перш за все, із загальною і зональною витратами коксу. Планується розглянути наслідки вибору задувальних шихт різного складу на параметри теплового і шлакового режимів задувки печі. Завданням дослідження є також розширення переліку характеристик задувальних шихт, що враховують зональність структури стовпа шихти діючої доменної печі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз джерел інформації свідчить про неоднозначність підходу для вирішення вказаного питання. Так Б.М. Жеребін (1980 р.) вважав, що для раціонального використання необхідного для задування коксу його слід ділити на дві частини, із котрих перша призначена для компенсації всіх теплових втрат в період завершеного теплообміну і складає так звану «нульову» шихту; друга розраховується на отримання заданих складу чавуну і шлаку в припущенні, що тепло від неї розраховується тільки на потреби власне металургійного процесу.

Пізніше Г.Г. Васюра зі співавторами (1990 р.) запропонували методику визначення витрати коксу в задувальну шихту за виразом:

$$K = (C_{\phi} + C_d + C_{\chi} + C_{\text{к.н.}})/C_{\text{к}}, \quad (1)$$

де K — витрата коксу, кг/т чавуну; C_{ϕ} — кількість вуглецю коксу, газифікованого на повітряних фурмах, кг/т; C_d — витрата коксу в реакціях прямого відновлення; C_{χ} — витрата коксу на науглецювання чавуну, кг/т; $C_{\text{к.н.}}$ — витрата вуглецю на утворення коксової насадки; $C_{\text{к}}$ — вміст вуглецю в коксі.

Як видно з наведеної формули (1) складова витрати вуглецю на компенсацію теплових втрат взагалі відсутня. Розробники методики запропонували визначати її окремо для проплавлення шихти першого об'єму, внаслідок чого розрахунок витрати коксу за виразом (1) є неповним. В той же час, включення складової витрати коксу на утворення коксової насадки є безумовно позитивним фактором. Однак і тут є зауваження, оскільки формула для визначення витрати коксу на утворення коксової насадки не є бездоганною:

$$P = \frac{0,785(h_{\text{м.ш.}} + h_f) \cdot d_r^2 + \frac{1}{3} \pi \left(\frac{d_r - 1}{2} \right) \cdot t g 45^\circ}{(1 - e)} \gamma, \quad (2)$$

де P — маса коксової насадки, т; $h_{\text{м.ш.}}$ — висота мертвого шару, м; h_f — відстань від осі чавунної лютки до осі повітряних фурм, м; d_r — діаметр горна; γ — насипна маса коксу, т/м³; e — коефіцієнт усадження; 45° — прийнятий кут відкосу коксу.

Так, за другим доданком в чисельнику (2) неможливо вирахувати об'єм конуса верхньої частини коксової насадки над горизонтом повітряних фурм,

оскільки не врахована подвійна довжина прифурменних порожнин в коксовій насадці $2L_{\text{д.ф.п.}}$ і подвійний висов повітряних фурм в горн $2L_{\text{в.ф.}}$. За прийнятої авторами умови рівності куту відкосу коксу 45° доданок у формулі (2) має бути наступним:

$$V_{\text{к.к.н.}} = 1/3 \pi \left(\frac{d_{\text{в}} - 2L_{\text{д.ф.п.}} - 2L_{\text{в.ф.}}}{2} \right)^3, \quad (3)$$

де $V_{\text{к.к.н.}}$ — об'єм конуса верху коксової насадки.

Прифурменна порожнина в коксовій насадці при умові дотримання рекомендованої швидкості витіку дуття в задувальному періоді в межах від 150 м/с [1] утворюється завжди і її довжину можна приймати для розрахунку в 1 м. Постійним зазвичай є і висов повітряних фурм в робочий простір горна (0,2—0,25 м).

Матеріали та методи. Для реалізації поставленої перед дослідженням мети запропоновано нову методику оцінювання характеристик задувальних шихт і використано практичні матеріали, що стосуються складу цих шихт і особливостей структури стовпа шихти.

Результати. Узагальнені дані про склад задувальних шихт, застосованих в період з початку 50-х років ХХ ст. до першого десятиліття ХХІ ст., наведено в таблиці 1. В якості характеристик цих шихт, крім рекомендованої [1] рудного навантаження (РН) і відомої (руднофлюсового навантаження (РФН), В.А. Улахович зі співавторами, 1998 р.), запропоновано чотири додаткових. Це відношення загального об'єму коксу $V_{\Sigma\text{к}}$ в шихті першого заповнення до корисного об'єму печі $V_{\text{кор}}$ ($V_{\Sigma\text{к}}/V_{\text{кор}}$). Це також відношення об'єму «чистого» коксу нижніх шихт (нульової і першої) $V_{\text{кнш}}/V_{\text{кор}} \cdot 100$, %. Третя додаткова характеристика призначена для оцінювання відносного об'єму коксової насадки $V_{\text{кн}}/V_{\text{кор}} \cdot 100$, %. Остання додаткова характеристика являє собою відношення маси шлакоутворюючих компонентів (шлаки, вапняк, кварцит) до маси залізорудних матеріалів (агломерат, обкотиші, залізна руда). Насипна маса коксу, прийнята в розрахунках, становила 0,5 т/м³, коефіцієнт усадження — 10 %.

Незалежно від корисного об'єму печей частка об'єму коксу в об'ємі задувальної шихти коливалась в межах 0,66—0,96 корисного об'єму досліджених агрегатів. Якщо ж порівняти цю частку для печей однакового об'єму 1386 м³, задутих в 50-х роках ХХ ст. (поз. 1 і 2 в табл. 1) і в 80-х роках того ж століття (поз. 9 і 10 в табл. 1), то в часі проглядається тенденція до суттєвого зростання характеристики $V_{\text{кокс}}/V_{\text{кор}}$ з 0,66—0,72 до 0,76—0,96. Зворотня тенденція збільшення витрати коксу в задувальну шихту в процесі удосконалення доменної технології вимагає пояснень.

Зі зміною уявлень про перебіг доменного процесу і формування структури стовпа шихти у пусковий період відбувався перегляд поглядів на вибір складу задувальної шихти. Так в 50-і роки минулого століття «нульова» шихта містила крім коксу шлакоутворюючі внаслідок побоювання утворення в'язких кислих шлаків при розчиненні в шлаку золи коксу. В прикла-

дах 1 і 2 (див. табл. 1) витрати вапняку з кварцитом в нульових шихтах склали 45,6 і 54,6 т відповідно.

З появою досліджень структури стовпа заморожених на ходу доменних печей [4; 5] і розуміння процесу створення коксової насадки [6] нульова і перша задувальні шихти містили вже тільки один кокс в межах 200—300 т, що складало 14—27 % корисного об'єму досліджених печей (приклади 3—7, табл. 1). Нульова і перша шихти останніх прикладів (12 і 13 в табл. 1) складала вже 33—37 % від корисного об'єму печей. Для задувальної шихти ДП № 6 НЛМК, що складалася з трьох шихт: кокс («0»), кокс зі флюсом («1») і кокс разом із залізорудними матеріалами («3»), показник $V_{к(0)}/V_{кор}$ досяг 48 % (приклад 11 в табл. 1).

Для виявлення зв'язку між витратами коксу в нульову і першу задувальні шихти з однієї сторони і розмірами коксової насадки з другої визначили об'єми останньої для конкретних доменних печей, задутих в 1993—2006 рр. Об'єми насадки визначи-

ли для двох основних типів формування зон когезії Л-подібної і W-подібної форм. Розрахунки частин об'єму коксової насадки проводили окремо для мертвого шару, підфурменної зони горна і надфурменного конусоподібного утворення в центрі печі. Методику розрахунку наведено в роботі [7], зокрема об'єм конуса малорухомого коксу при W-подібній зоні когезії розраховували за виразом (3). Результати представлено в таблиці 2.

Порівняння практичних даних про розмір коксових шихт (нульової і першої) з таблиці 1 з розрахунковими даними таблиці 2 показує, що існує певний зв'язок між способом організації структури стовпа шихти і розмірами коксової насадки. Так, переважним типом зон когезії в радянських доменних печах була W-подібна зона, і об'єм суто коксових нижніх шихт в задувальних шихтах становив 14—27 % корисного об'єму (приклади 3—7 в табл. 1). Розрахунковий об'єм коксу в коксових насадках печей з W-подібною

Таблиця 1

Склад і характеристики задувальних шихт доменних печей

Об'єм доменної печі $V_{кор}$, м ³ ; регіон; підприємство; рік задування	Шихта							Джерело інформації, рік
	Склад			Характеристики				
	Кокс		Рудно-флюсові матеріали, т	$V_{зк} / V_{кор}$	$V_{кш} / V_{кор} \times 100, \%$	РФН / РН	Частка шлакоутворюючих відносно рудної частини, %	
	Маса, т	Об'єм, м ³ ($V_{кокс}$)						
1386, Урал, рф, 1952* ¹	559	998	823	0,72	—	1,47 / 0,76	55,6	Довідник «Доменное пр-во», Т. 2. 1963
1386, Урал, рф, 1954* ²	510	910	602	0,66	—	1,18 / 0,71	66,2	Там же
2000, ММК, рф, н.д.	900	1607	634	0,80	27	0,70 / 0,44	44,8	«Справочник мастера-доменщика», 1977
2000, ЗСМК, рф, н.д.* ³	945	1688	741	0,84	23	0,78 / 0,45	75,2	Там же
2300, МарМК, Україна, н.д.	849	1516	692	0,66	16	0,82 / 0,54	51,8	Там же
2700, ЧерМК, рф, н.д.	1020	1821	1068	0,67	17	1,047 / 0,49	111,8	Там же
3000, ЗСМК, рф, н.д.* ⁴	1449	2588	1197	0,86	14	0,83 / 0,44	87,8	Там же
3000, АлМК, Україна, н.д.	1108	1979	2386	0,66	н.д.	2,15 / 0,41	179,8	Г.Г. Васюра зі співр., 1990
1386, АлМК, Україна, н.д.	588	1050	271	0,76	н.д.	0,46 / 0,34	36,8	Там же
1386, АлМК, Україна, н.д.	745	1330	426	0,96	н.д.	0,57 / 0,49	16,4	Там же
5500, ЧерМК, рф, 1986	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	38	1,14 / н.д.	н.д.	В.А. Улахович зі співр., 1988
3200, НЛМК, рф, 1996	1500	2678	1147	0,84	48	0,76 / 0,72	5,7	В.Н. Григор'єв, зі співр., 1999
1719, АМКР, Україна, 2003	819	1462	1027	0,85	33	1,25 / 0,74	70,0	[2], 2005
1719, ЄМЗ, Україна, н.д.	886	1582	138	0,92	37	0,63 / 0,48	32,8	[3], 2018

*1 +79 м³ дров; *2 +101 м³ дров; *3 +100 м³ дров; *4 +150 м³ дров

Результати розрахункового визначення об'ємів коксової насадки в доменних печах, задутих в 1993—2006 рр. при роботі з Λ -подібною (чисельник) і W -подібною (знаменник) зонами когезії

Показники	Доменні печі, номер, назва підприємства				
	№ 2, ЗСт	№ 5, ЄМЗ	№ 8, АМКР	№ 1, АМК	№ 6, НЛМК
Об'єм, м ³	1513	1513	2700	3000	3200
Діаметр горна, м	8,6	8,8	11,0	11,6	12,0
Рік задування	2003	2005	2006	2005	1993
Об'єми коксу в коксовій насадці, м ³ : надфурменного конуса	117 / 25	125 / 33	317 / 74	389 / 93	443 / 107
горна нижче горизонту фурм	181	213	338	345	586
мертвого шару (зумпфу)	58	60	126	190	179
в цілому масиві	356 / 264	398 / 306	781 / 538	924 / 628	1208 / 872
об'єм коксу в коксовій насадці відносно корисного об'єму печі, %	23,5 / 17,4	26,3 / 20,2	28,9 / 19,9	30,8 / 20,9	37,8 / 27,2

пластичною зоною коливався приблизно в таких же межах 17—27 % $V_{\text{кор}}$ (табл. 2).

На доменних печах з формуванням Λ -подібної зони когезії (приклади 11—14, табл. 1) об'єм нульового коксу в задувальних шихтах зріс до 33—48 %. Розрахунок, незважаючи на прийняті умовності формування стовпа шихти з Λ -подібною пластичною зоною, показав також суттєве збільшення коксової зони залежно від об'єму печей до 24—39 % (табл. 2). На новій ДП № 5 фірми SAIL RSP об'ємом 4060 м³ (Індія), витрата коксу в нульову шихту досягла 0,58 $V_{\text{кор}}$ [8].

Для достатнього нагріву коксу для коксової насадки має значення розподіл нульової і першої коксових шихт в робочому просторі печі. Так, на канадській ДП № 3 фірми Essar Steel Algoma's згідно з повідомленням [7], нульову шихту завантажували в зумпф до рівня вище чавунних льоток. Далі до верхньої кромки горна вантажили деревину, а потім до середини заплечиків — кокс першої задувальної шихти. Кокс, засипаний в зумпф, в задувальному періоді нагрівали традиційним способом крізь перфоровані труби, вставлені в чавунні льотки. Верхню частину коксової насадки в горні формували нагрітим коксом із заплечиків за рахунок вигорання деревини і заміщення її коксом.

У випадку з використанням металічного помосту при задуванні ДП № 3 ЄМЗ [3] нульову коксову шихту завантажували під поміст, а першу коксову шихту розміщували над помостом до верху заплечиків. Поміст виконував подвійну функцію. За однією слугував опорою зі шпал для захисту повітряних фурм. За другою затримував кокс в заплечиках для кращого прогрівання перед надходженням в коксову насадку.

Успішне задування доменних печей з високими значеннями критерію $V_{\text{кн}}/V_{\text{кор}}$ (приклади 11—14, табл. 1) свідчить про доцільність вибору витрати коксу в задувальну шихту з урахуванням зональності структури стовпа шихти. Частка коксу в робочому об'ємі шихти $V_{\text{СК}}/V_{\text{кор}}$ при цьому повинна складати не менше 0,84.

Практика показала, що орієнтація тільки на вели-

чину рудного навантаження, як це рекомендується [1], не є достатньою при визначенні витрати коксу в задувальну шихту, оскільки на тепловий стан печі в задувальний період впливає не тільки залізорудні складові, але й шлакоутворюючі частини, які в окремих випадках переважали масу рудної частини (приклади 6 і 8, табл. 1).

Випадки публікацій про помилковий вибір задувальної шихти з відомої причини вкрай рідкі, внаслідок чого кожне повідомлення такого роду заслуговує на додатковий розгляд. Саме недооцінення впливу маси шлакоутворюючих в задувальній шихті на тепловий стан печі призвело до негативних наслідків в задувальному і у подальшому роздувальному періодах (приклади 1 і 8, табл. 1). В цьому плані окремого розгляду заслуговують результати задувки доменних печей об'ємом 1386 м³ з різними відносними витратами коксу і шлакоутворюючих в задувальну шихту (приклади 1 і 2, табл. 1).

Незважаючи на більшу відносну витрату коксу 0,72 $V_{\text{СК}}/V_{\text{кор}}$ і рудне навантаження, близьке до рекомендованого [1], а саме 0,76, завищене руднофлюсове навантаження призвело до різкого зменшення нагріву чавуну і падіння в ньому вмісту кремнію (рисунк, а), зменшення нагріву шлаку, про що свідчили зростання вмісту FeO в шлаку і сірки в чавуні. Навпроти, у другому прикладі таблиці 1, при зменшенні витрат коксу відносно корисного об'єму печі до 0,66, однак при зменшених руднофлюсовому і рудному навантаженні (рисунк, б), вдалося витримати режим виплавки ливарного чавуну з достатнім нагрівом продуктів плавки.

Про різку втрату нагріву ДП № 1 АМК об'ємом 3000 м³ в пусковому періоді повідомляли Г.Г. Васюра зі співробітниками (1990 р.).

Внаслідок завищеного руднофлюсового навантаження (2,15) при низькому рудному (0,41) і низькій відносній витраті коксу в задувальну шихту (0,66 $V_{\text{СК}}/V_{\text{кор}}$) вміст кремнію в перших випусках склав лише 0,23 і 0,38 %.

Обговорення результатів. Розглянуті вище при-

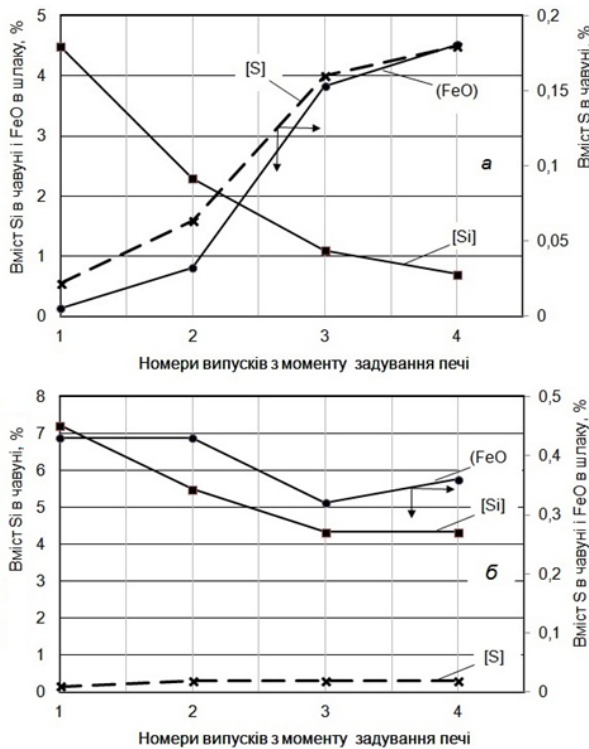


Рис.

Реакція доменного процесу в зміні складу чавуну і шлаку в роздувальні періоди доменних печей об'ємом 1386 м³ при завищенні руднофлюсового навантаження (а, рядок 1 в таблиці 1) і збалансованому навантаженні (б, рядок 2 в таблиці 1)

Джерело: за даними довідника «Доменное производство», Т. 2, 1963 року видання

клади свідчать про те, що рудне навантаження не може бути надійним критерієм задувальної шихти, оскільки на теплообмінні процеси впливають крім залізрудних матеріалів шлакоутворюючі компоненти, витрату яких в шихту першого заповнення, по можливості, слід зводити до мінімуму. На нашу думку перелік шихтових матеріалів, рекомендованих ІЧМ [1] для задувальних шихт, слід, по можливості, скоротити за рахунок складових, що не пройшли металургійної обробки, а саме залізної руди і вапняку.

Щодо застосування шару деревини в задувальній шихті доменних печей існують прямо протилежні погляди — від повного заперечення корисності застосування (В.Н. Григор'єв зі співробітниками, 1999 р.) до твердження про доцільність використання дров, зокрема на печах великого об'єму [8; 9]. Критики практики застосування дров'яного шару вважають її нічим іншим, як даниною традиції.

На нашу думку це застосування хоча і є традиційним (В.І. Гулига, 1937 р.), але має технологічне обґрунтування, яке полягає в наступному:

- зводиться до мінімуму утворення застійних газових зон, що перешкоджають рівномірному прогріванню коксу в перетині печі [9];

- покращується термічна підготовка коксу перед горінням на фурмах і утворенням коксової насадки;

- створюється поштовх для початку руху шихти, оскільки при задуванні печі тільки на коксі повільне

горіння коксу гальмує початок стійкого опускання шихти і темп задування;

— горіння шару деревини на початку задувального періоду полегшує поновлення сходу шихти у разі непередбачуваних зупинок. Саме з цих міркувань використання дров'яного шару не втратило прихильників, зокрема в Канаді [7], Бразилії [10] та Індії [8]. В останньому випадку спеціалісти фірм Rourkela Steel Plant і Danieli Corus здійснили задування печі із завантаженням деревини в горн до рівня повітряних фурм. Частка об'єму горна від зумпфу до рівня фурм становила 590 м³.

Узагальнення використання задувальних шихт показало, що в процесі розвитку доменної технології прослідковується тенденція збільшення об'ємних часток коксу як в загальній шихті першого заповнення, так і в шихтах заповнення горна і заплечиків. Якщо на початку 50-х років ХХ ст. об'ємна частка коксу в загальних задувальних шихтах складала 0,66—0,72 корисного об'єму доменних печей об'ємом 1386 м³, то вже у 80-х роках того ж століття на печах однакового об'єму ця частка зросла до 0,76—0,96.

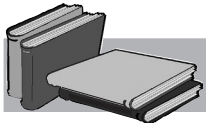
Висновки

Для покращення оцінки задувальних шихт доменних печей вперше запропоновано ввести додаткові характеристики їх порівняння, а саме три наступні: відношення загального об'єму коксу в шихті першого заповнення, відношення об'єму «чистого» безфлюсового коксу нижніх шихт (нульової і першої), відношення об'єму коксової насадки до корисного об'єму доменної печі. Запропоновано також оцінювати відношення маси шлакоутворюючих компонентів (шлаки, вапняк, кварцит) до маси залізрудних матеріалів (агломерат, обкотиші, залізна руда).

Вперше встановлено існування зв'язку між відносною об'ємною витратою коксу в нульову і першу безфлюсову шихти з відносним об'ємом коксової насадки, сформованої при відмінних формах структури стовпа шихти. З переходом з W-подібної форми зони когезії до Λ-подібної обидві характеристики зростають незалежно від об'єму доменних печей.

Показано, що визначальними факторами для успішного задування доменних печей є збалансований вибір руднофлюсового навантаження на кокс в шихті першого заповнення і достатній об'єм коксу для формування коксової насадки в горні і заплечиках. Рудне навантаження на кокс не може бути надійним критерієм задувальної шихти, оскільки не враховує витрату шлакоутворюючих компонентів.

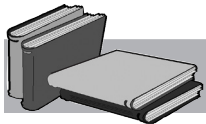
Продовження практики використання дров'яного шару в задувальній шихті доменних печей є результатом технологічної доцільності, а не проявом традиційного консерватизму.



ЛІТЕРАТУРА

1. Основные положения задувок доменных печей после остановок различной продолжительности / А. М. Кузнецов и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2015. Вып. 30. С. 90—109.
2. Крячко Г. Ю., Васюченко П. А., Сафина Л. А. Замедленная раздувка доменной печи после ремонта второго разряда. *Зб. наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2005.
3. Шумельчик Є. І., Горупаха В. В. Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою. Наукова робота, представлена на здобуття премії Президента України для молодих вчених. Дніпро, 2018. 17 с. URL: https://www.kdpu-nt.gov.ua/sites/default/files/work_files/presentationshumelchik_horupakha11_0_0.pdf (дата звернення: 20.06.2024).
4. Гуденау Г.-В., Сасабе М., Крайбих К. Исследования на охлажденных доменных печах Японии. *Черные металлы*. 1977. № 6—7. С. 13—17.
5. Хосидэ Й., Такачи С., Юномура А. Совершенствование технологии доменной плавки в Японии. *Черные металлы*. 1980. № 25—26. С. 3—7.
6. Нисио Х., Венцель В., Гуденау Г. В. Значение тотермана в доменной печи. *Черные металлы*. 1977. № 18. С. 9—15.
7. Successful Blow-in of Essar Steel Algoma's Blast Furnace 7 / L. Jones et al. *Technical contribution to the 3rd International Meeting on Ironmaking*, September 22-26, 2008. Sao Luis City — Maranhao State — Brazil. P. 1357—1368. <https://doi.org/10.5151/2594-357x-0137>
8. Bak J., Engel E., Laar R. van. SAIL RSP Blast Furnace No. 5 — A Greenfield Project in a Brownfield Optimization Context. *Technical contribution to the 44th Ironmaking and Raw Materials Seminar, 15rd Brazilian Symposium on Iron Ore and 2nd Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore*, September 15th to 18th, 2014, Belo Horizonte, MG, Brazil. P. 5765—5772. <https://doi.org/10.5151/2594-357X-25638>
9. Технологическое обоснование рациональных приемов задувки доменных печей большого и среднего объемов / В. И. Большаков и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2009. Вып. 20. С. 3—10.
10. Alter M., McGovern C. C. The Best Way to Blow-in of Blast Furnace: Definition, Philosophy, Theory and Practical Approach. *AISTech Proceedings*, 2013. P. 367—379. URL: <https://www.researchgate.net/publication/353130610> (дата звернення: 20.06.2024).

Надійшла 04.09.2024



REFERENCES

1. Kuznetsov, A. M., Kovalenko, A. G., Zubenko, A. V., Gorupakha, V. V., Nesterov, A. S., Mozharensko, N. M., & Semenov, Yu. S. (2015). Osnovnyie polozheniya zaduvok domennyih pechey posle ostanovok razlichnoy prodolzhitel'nosti [The main provisions of the blowers of blast furnaces after shutdowns of various durations]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, (30), 90-109 [in Russian].
2. Kryachko, G. Yu., Vasyuchenko, P. A., & Safina, L. A. (2005). Zamedlennaya razduvka domЕННОY pechi posle remonta vtorogo razryada [Slow blowing of a blast furnace after second-class repairs]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)* [in Russian].
3. Shumelchik, Ye. I., & Gorupakha, V. V. (2018). Rozrobka i vprovadzhennia novykh pidkhodiv do diahnostryky ta upravlinnia domENNOIU plavkoIU [Development and promotion of new approaches to diagnostics and control of blast furnace smelting]. Scientific work, presented at the Presidential Prize of Ukraine for young adults. Dnipro. https://www.kdpu-nt.gov.ua/sites/default/files/work_files/presentationshumelchik_horupakha11_0_0.pdf [in Ukrainian].
4. Goodenow, G.-V., Sasabe, M., & Kreibich, K. (1977). Issledovaniya na ohlazhdennyih domennyih pechah Yaponii [Research on cooled blast furnaces in Japan]. *Stahl und Eisen*, (6-7), 13-17 [in Russian].
5. Hoshide, Y., Takachi, S., & Yunomura, A. (1980). Sovershenstvovanie tehnologii domENNOY plavki v Yaponii [Improvement of blast furnace smelting technology in Japan]. *Stahl und Eisen*, (25-26), 3-7 [in Russian].
6. Nishio, H., Wenzel, V., & Goodenow, G.-V. (1977). Znachenie tottermana v domENNOY pechi [The significance of totterman in a blast furnace]. *Stahl und Eisen*, (18), 9-15 [in Russian].
7. Jones, L., Vanmarrum, D., Tuomi, J., Kuuskman, P., Krasavtsev, A., Quigley, K., Hyde, J. B., & Cameron, J. (2008). Successful Blow-in of Essar Steel Algoma's Blast Furnace 7. *Technical contribution to the 3rd International Meeting on Ironmaking*, September 22-26, Sao Luis City – Maranhao State, Brazil, 1357-1368. <https://doi.org/10.5151/2594-357x-0137>

8. Bak, J., Engel, E., & Laar, R. van (2014). SAIL RSP Blast Furnace No. 5 – A Greenfield Project in a Brownfield Optimization Context. *Technical contribution to the 44th Ironmaking and Raw Materials Seminar, 15rd Brazilian Symposium on Iron Ore and 2nd Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore*, September 15th to 18th, Belo Horizonte, MG, Brazil, 5765-5772. <https://doi.org/10.5151/2594-357X-25638>
9. Bolshakov, V. I., Mozharensko, N. M., Ivancha, N. G. et al. (2009). Tehnologicheskoe obosnovanie ratsionalnykh priemov zaduvki domennykh pechey bolshogo i srednego ob'emov [Technological justification of rational methods of blowing blast furnaces of large and medium volumes]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, (20), 3-10 [in Russian].
10. Alter, M., & McGovern, C. C. (2013). The Best Way to Blow-in of Blast Furnace: Definition, Philosophy, Theory and Practical Approach. *AISTech Proceedings*, 367-379. <https://www.researchgate.net/publication/353130610>

Received 04.09.2024

Summary

H.Yu. Kriachko, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov, e-mail: krachkogennadij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>
Ye.M. Siharov, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov, e-mail: en_sigarev@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

Dniprovsky State Technical University (Kamianske, Ukraine)

To the Question of Choosing the Characteristics of Blowing Charges of Blast Furnaces

The successful output of blast furnaces (BF) to design capacity and duration of their campaign depend to a large extent on the choice of rational technology of the blowing period and composition of the blowing charge. The key factor in choosing the composition of blowing charges is the issue of determining the consumption of coke, the most valuable component of the charges and the determining factor for the successful start-up of the blast furnace. The analysis of the sources of information indicates the ambiguity of the approach to solving the specified issue.

The purpose of the work is to generalize the experience of using blast furnace charges to improve their characteristics, primarily related to total and zonal coke consumption.

It is shown that with the advent of research on the structure of the charge column of blast furnaces frozen in operation and the understanding of the coke nozzle formation process, the approaches to the formation of the blowing charge changed, primarily this affected the volumes of fluxless coke in the lower charges. The proposed new characteristics of blowing charges related to the useful volume of the furnace V_{cor} , in particular the volume fraction of coke in the total blowing charge V_{zk}/V_{cor} , the volume fraction of coke loaded without flux of zero and first charges V_{knt}/V_{cor} , volume capacity fraction of the coke nozzle V_{knt}/V_{cor} .

The trend of growth of the specified characteristics in the process of improving the domain technology was revealed. Yes, if at the beginning of the 50s of the XX century on furnaces with a volume of 1386 m³, the index V_{zk}/V_{cor} was 0.66-0.72, then in the 70s and later it increased to 0.76-0.96. In the 1960s and 1970s, the volume of fluxless coke in the lower charges fluctuated between 14 and 27 % of V_{cor} , and in the 1980s and 1990s of the last century and at the beginning of the new century it increased to 33-48 %. This significantly improved the conditions for the formation of coke nozzle during the blowing period of blast furnaces.

The existence of a relationship between the relative volume consumption of coke in the zero and first fluxless charges with the relative volume of the coke nozzle, formed with different forms of the structure of the charge column, was established. With the transition from W-shaped cohesion zone to Λ-shaped, both characteristics increased regardless of the volume of the blast furnaces.

It is shown that the ore load on coke cannot be a reliable criterion for the blowing charge, as it does not take into account the additional consumption of slag-forming components.

Keywords

Blast furnace, blowing charge, charge characteristics, volume fraction, coke, nozzle, ore load.