

ЗВ'ЯЗОК ІНТЕНСИВНОСТІ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ ЗІ СТРУКТУРОЮ СТОВПА ШИХТИ І РАДІАЛЬНИМ ГАЗОРОЗПОДІЛОМ

Анотація. Метою роботи є дослідження впливу інтенсивності плавки на формування структури стовпа шихти і радіальний газорозподіл в перетині доменних печей. На основі аналізу стану стовпа шихти заморожених на ходу доменних печей, що працювали з різним рівнем інтенсивності плавки, показано зміни в структурі стовпа, викликані зростанням інтенсифікації процесу. Це зростання збільшує висоту надфурменної частини коксової насадки і її загальний об'єм. При цьому збільшується кількість коксових вікон в пластичній зоні і відповідно зростає газопроникність зони. Крім того, інтенсифікація зменшує або усуває окружну нерівномірність у формуванні зон когезії і коксової насадки. Порівняння характерних періодів роботи печі об'ємом 1754 м³ дозволило встановити, що перевищення рівня інтенсивності плавки з 0,650 до 1,009 т/м³·доб, тобто в півтора рази, викликало наступні зміни в радіальному газорозподілі – нерівномірність його за показником коефіцієнта варіації концентрацій CO₂ зростає в середньому з 21 до 30%, а ступінь підвантаження периферії за критерієм CO_{2п}/CO_{2ц} зменшилась з 0,89 до 0,65. Наведено дані газорозподілу по трьох інших печах різних підприємств, що знаходяться у повній відповідності з результатами, отриманими на печі об'ємом 1754 м³ Дніпровського металургійного комбінату. На відміну від існуючого уявлення про те, що підвищення інтенсивності плавки сприяє вирівнюванню радіального газорозподілу, показана залежність форсування ходу від розкриття периферійно-осьових зон на череповецькій печі об'ємом 2000 м³ (зростання інтенсивності за спаленим коксом на 9%) і на магнітогорській печі об'ємом 1300 м³ від розкриття периферійної зони (зростання інтенсивності на 8%). Зазначено, що у випадку існування відносно незмінних сировинних умов, інтенсифікація доменного процесу за будь-яким індексом відбувається за рахунок розкриття периферійно-осьових віддушин, розміри яких в перетині визначають теплову і відновлювальну роботу газового потоку та ефективність доменної плавки в цілому.

Ключові слова: доменна піч, інтенсивність плавки, структура, стовп шихти,



радіальний газорозподіл, периферійно-осові віддушини.

Посилання для цитування: Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М. Зв'язок інтенсивності доменної плавки зі структурою стовпа шихти і радіальним газорозподілом. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 320-331. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-020>

Вступ. Виходячи з теоретичних уявлень (О.Н. Рамм, 1980 р.) і численних даних моделювання, зокрема І.З. Буклана та ін. (1995 р.) збільшення об'ємної витрати дуття і, відповідно, інтенсивності плавки за коксом, газом і т.п. повинно обмежуватись зростанням перепаду тисків в стовпі шихти до певної межі. В реальних умовах доменної плавки збільшення інтенсивності за рахунок форсування дуттям стає можливим при зниженні перепаду тисків в п'яти основних випадках:

- 1) при покращенні гранулометричного складу шихти і її металургійних властивостей;
- 2) при розкритті традиційних віддушин стовпа шихти периферії і центра зміною режиму завантаження;
- 3) при збільшенні числа і діаметра повітряних фурм;
- 4) при зміні параметрів дуття;
- 5) при підвищенні тиску газів в робочому просторі печі при наявності резерву повітродувних засобів.

Сформоване і змінне в часі сполучення матеріальних і параметричних факторів визначає структуру стовпа шихти і, зокрема, одну із характеристик цієї структури – радіальний газорозподіл. Від структури стовпа шихти і радіального газорозподілу, як результатуючих чинників організації протитоку, залежать інтенсивність ходу печі і головні показники доменного процесу. Вочевидь, що кожний напрям інтенсифікації процесу дуттям буде мати різні результативність та ефективність плавки зважаючи на різницю в умовах теплової і відновлювальної роботи газового потоку.

Існує небезпідставний погляд на те, що інтенсивність плавки суттєво залежить від структури стовпа шихти (В.І. Большаков, 2002 р.). Однак слід зважати і на зворотну залежність процесу формування структури стовпа шихти від інтенсивності плавки, оскільки витрата дуття і вихід фурменних газів поряд з розподілом шихти по радіусу печі формують зону когезії та обриси коксової насадки в заплечиках і горні. Тому доцільним є розгляд взаємозалежності інтенсивності плавки зі структурою стовпа шихти.

Вперше на тісний зв'язок інтенсивності плавки і газорозподілу в перетині доменної печі було звернуто увагу в роботі А.М. Чернятіна зі співробітниками, 1966 р. Аналізуючи середньомісячні дані поточного технологічного контролю ДП ММК об'ємом 1300 м³ (рф) і печі

об'ємом 2000 м³ Череповецького меткомбінату (рф) автори прийшли до висновку, що основною причиною більш економічної роботи череповецької ДП був більш рівномірний розподіл газових потоків. Було рекомендоване таке регулювання газорозподілу, котре при роботі на максимальних витратах ((з точки зору сходження шихти) дуття забезпечить підтримання середньодекадних величин інтенсивності горіння сумарного вуглецю у вузькому (0,03 т/м³доб) оптимальному діапазоні.

При відпрацюванні технології доменної плавки зі зниженою інтенсивністю на п'яти доменних печах Череповецького меткомбінату М.П. Сисоевим та ін. (1993 р.) було встановлено зв'язок витрати коксу з розподілом матеріалів і газів в печі. Зокрема повідомлялося про те, що витрата коксу залишиться незмінною або збільшиться, якщо газорозподіл відповідно залишиться незмінним або погіршиться: витрата коксу зменшиться при скороченні периферійного потоку газів за рахунок підвантаження периферійної зони рудними матеріалами і помірного розвитку осевого потоку газів.

Наведені приклади свідчать про існування протиріччя в підходах до отримання бажаного зв'язку між інтенсивністю плавки і газорозподілом, рівномірним або з певним ступенем нерівномірності.

Мета роботи. Дослідити вплив інтенсивності плавки на формування структури стовпа шихти і радіальний газорозподіл в перетині доменних печей.

Основні результати дослідження. Для оцінки залежності структури стовпа шихти від інтенсивності плавки співставили результати досліджень структури стовпа шихти заморожених на ходу японських доменних печей №1 заводу Амагасакі [1] і №1 Хірохата [2] (рис. 1). Показники роботи вказаних печей і об'єми коксової насадки, визначені нами [3], представлені в таблиці 1.

Оскільки Японія використовує якісну імпортовану доменну сировину кокс і залізорудні матеріали на обох печах були близьких кондицій. Головною відмінністю в стратегії ведення доменного процесу був вибір пріоритету. На ДП №1 Амагасакі за рахунок підтримання високого рудного навантаження і помірної інтенсивності плавки мали високу ефективність плавки – питома витрата палива склала лише 451 кг/т чавуну.

Висока результативність плавки (53,2 т/м²доб) на ДП №1 Хірохата була досягнута за рахунок більшої інтенсивності плавки, але з суттєво підвищеною питомою витратою палива (542 кг/т чавуну).

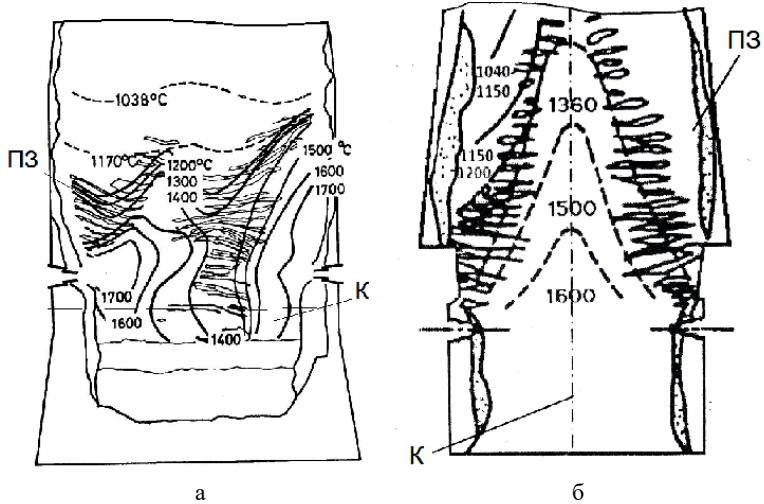


Рисунок 1 – Форма пластичної зони і масиву коксової насадки в заморожених доменних печах Амагасакі, №1 (а) і Хірохата, №1 (б) за даними [1, 2]: цифри біля кривих – ізотерми; к – коксова насадка; ПЗ – пластична зона

Таблиця 1 - Показники роботи до видувки заморожених доменних печей і кількісні характеристики їх коксових насадок за даними [1-3]

Показники	Завод, номер печі	
	Амагасакі, №1	Хірохата, №1
Діаметр горна, м	6	7,8
Корисний об'єм, м ³	721	1407
Питома продуктивність, т/м ² ·доб	48,8	53,2
Витрата палива (кокс + мазут), кг/т	451	542
Рудне навантаження на кокс	3,57	3,12
Інтенсивність плавки за використаним паливом I_p , т/м ³ ·доб	0,854	0,979
Об'єм коксової насадки, м ³ /% корисного об'єму печі в елементах профілю:		
- горні	100 / 13,9	235 / 16,7
- заплечиках	40 / 5,5	133 / 9,5
- розпарі	-	133 / 9,5
- шахті	-	23 / 1,6
Загальний об'єм насадки, м ³ /% $V_{кор}$	140 / 19,4	391 / 27,8

Розгляд інформації, приведеної на рис. 1 дозволяє зробити певні висновки щодо впливу інтенсивності плавки на формування стовпа шихти:

- 1) збільшується висота надфурменної частини коксової насадки;
- 2) збільшується загальний об'єм коксової насадки;
- 3) збільшується кількість вікон в пластичній зоні і відповідно зростає газопроникність критичної зони;
- 4) зменшується або усувається окружна нерівномірність у формуванні зон когезії і коксової насадки.

Для вивчення зв'язку інтенсивності плавки з газорозподілом і газопроникністю стовпа шихти використали показники роботи ДП №8 Дніпровського металургійного комбінату (ДМК) об'ємом 1754 м³ яка в 1979 р. працювала з номінальною підвищеною інтенсивністю, а в 1997 р. відповідно до надходження замовлень – зі зниженою (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники роботи доменної печі №8 Дніпровського меткомбінату в досліджувані періоди

Показники	Періоди	
	I – XII, 1979 р.	VII – XII, 1997 р.
Питома продуктивність, т/м ³ ·доб	1,672	1,027
Інтенсивність горіння палива (кокс + природний газ), т/м ³ ·доб	1,009	0,650
Витрата на 1 т чавуну:		
- коксу, кг	556	574
- природного газу, м ³	60	74
- кисню, м ³	-	15
Дуття:		
- витрата, м ³ /хв	3735	2480
- надмірний тиск, кПа	268	218
- температура, °С	1050	992
Надмірний тиск колошникового газу, кПа	138	110
Загальний перепад тисків, кПа	130	108

Для аналізу було відібрано масиви виробничих даних кількістю 240 одиничних добових періодів за 1979 рік (планова економіка) і 70 таких же періодів за друге півріччя 1997 року (ринкові умови). Умовою формування масивів даних була рівна робота печі без простоїв і збавленого дуття з відбором проб радіального газу і нормальною роботою обладнання, що реєструє часткові перепади тисків по висоті доменної печі. Амбразура відбору імпульсу виміру тиску газу знаходилась на відстані 13,7 м від горизонту повітряних фурм. Робоча висота стовпа матеріалів над рівнем фурм становила 22,9 – 23,9 м в залежності від прийнятого рівня засипу.

Розподіл газового потоку оцінювали двома показниками – нерівномірністю розподілу концентрацій CO_2 в газі по радіусу печі V_P і ступенем периферійності розподілу $\text{CO}_{2П}/\text{CO}_{2Ц}$. Перший показник V_P – коефіцієнт варіації визначався за виразом $V_P = 100\sigma/\text{CO}_2$, де σ – середньоквадратичне відхилення вимірів від середнього значення концентрацій CO_2 по радіусу печі. Другий показник, ступінь периферійності газорозподілу $\text{CO}_{2П}/\text{CO}_{2Ц}$, запропонований О.Л. Берінім (1980 р.) означав собою відношення середніх концентрацій CO_2 в газі двох рівновеликих за площею частин перетину печі на горизонті відбору проб газу периферійної $\text{CO}_{2П}$ і центральної $\text{CO}_{2Ц}$. Стійкість радіального газорозподілу оцінювали за величиною розмаху коливань концентрацій CO_2 в газі в окремих точках радіусу шахти за весь період розгляду.

Результати дослідження взаємозв'язку інтенсивності плавки з показниками радіального газорозподілу представлені на рис. 2. Для запобігання загромождження кореляційного поля дані за 1979 р. з підвищеною інтенсивністю плавки представлені показниками лише за липень-серпень, що є типовими для всього періоду спостережень в цьому році. Загальною закономірністю для двох різних періодів роботи ДП №8, які відрізнялися перш за все рівнем форсування ходу дуттям є тенденція до посилення периферійного потоку газів (зниженню показника $\text{CO}_{2П}/\text{CO}_{2Ц}$ – рис. 2, а) і збільшення ступеню нерівномірності радіального газорозподілу V_P в процесі інтенсифікації плавки (рис. 2, б).

Порівняння характерних періодів роботи печі дозволило встановити, що перевищення рівня інтенсивності плавки з 0,650 до 1,009 т/м³·доб, тобто в півтора рази, викликало наступні зміни в радіальному газорозподілі – нерівномірність його за показником коефіцієнта варіації концентрацій CO_2 зросла в середньому з 21 до 30%, а ступінь підвантаження периферії за критерієм $\text{CO}_{2П}/\text{CO}_{2Ц}$ зменшилась з 0,89 до 0,65.

При збільшенні витрати дуття понад 1,42 м³/м³·хв на ДП №8 ДМК в період роботи зі зниженою інтенсивністю плавки (друге півріччя 1997 р.) відмічено зниження верхнього перепаду тисків (рис. 3, а) і розмаху коливань вмісту CO_2 між центром печі і гребнем (максимумом CO_2) на кривій газорозподілу. Подібну зміну газопроникності В.М. Паршаков та ін. (1979 р.) спостерігали під час досліджень на Нижньотагільському комбінаті (рф) ДП об'ємом 2700 м³ і пояснили її збільшенням порозності шихти в сухій частині шахти при певному збільшенні кількості пічних газів.

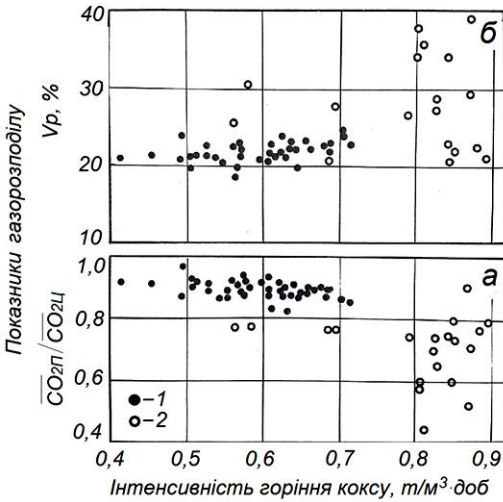


Рисунок 2 –
 Взаємозв'язок
 інтенсивності плавки за
 спаленим коксом з
 характеристиками
 нерівномірності
 радіального газорозподілу
 на доменній печі №8
 ДМК в періоди роботи,
 характерні для ринкової
 (1) і планової (2) економік

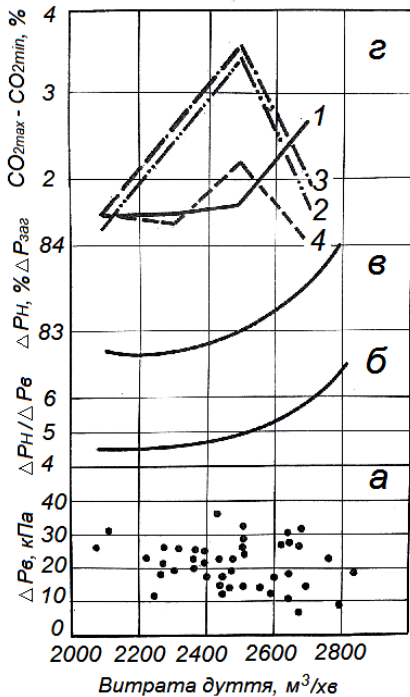


Рисунок 3 – Вплив витрати
 дуття на коливання вмісту CO_2
 в радіальному газі під рівнем
 засипу (а) і на показники
 газопроникності стовпа шихти
 (б-г) ДП №8 ДМК в
 досліджуваний період (VII-XII
 1997 р.): ΔP_v , ΔP_n , ΔP_{zag} –
 перепади тисків пічного газу –
 верхній, нижній і загальний
 відповідно; 1, 2, 3, 4 – розмах
 коливань вмісту CO_2 в
 радіальному газі в центрі,
 локації, віддаленій на 0,69 м
 від центра печі, гребені і на
 периферії, відповідно

Особливістю газодинамічного режиму досліджуваної печі №8 ДМК був переважний вплив на загальну газопроникність стовпа шихти

опору нижньої зони (рис. 3, б, в). Така особливість була встановлена раніше [4] на подібній за об'ємом ДП №1 Криворіжсталі, яка працювала на достатньо високому надмірному тискові колошникового газу (158 кПа) з питомою продуктивністю 1,974 т/м³·доб.

Аналіз показав, що інтенсифікація процесу дуттям на досліджуваній печі супроводжувалось не тільки збільшенням нерівномірності радіального газорозподілу, але зростанням його нестійкості (рис. 3, г), обумовленої коливанням газопроникності окремих зон доменної печі найбільший розмах концентрацій CO₂ в радіальному газі мав місце на периферії при витратах дуття 1,37-1,48 м³/м³·хв, найменший в гребені при 1,48-1,60 м³/м³·хв дуття.

Характерно також, що в дослідженому діапазоні збільшення витрати дуття розмах коливань CO₂ в центрі зростає. Звертає на себе увагу нестійкість газопотоку в локації, віддаленій на 0,69 м від центра печі.

Повертаючись до розгляду згаданої вище роботи А.М. Чернятіна зі співавторами слід зазначити, що дослідники не звернули увагу на факт погіршення радіального газорозподілу при збільшенні інтенсивності плавки (рис. 4). На ДП ЧерМЗ збільшення інтенсивності розкривало периферію і центр (вміст CO₂ в газі там знизився). А на печі ММК, незважаючи на вирівнювання газорозподілу, різко посилювся периферійний газопотік при послабленні осьового. Тобто форсування ходу печей дуттям в розглянутих випадках стало можливим перш за все за рахунок розкриття периферії, як до речі і на ДП №8 ДМК.

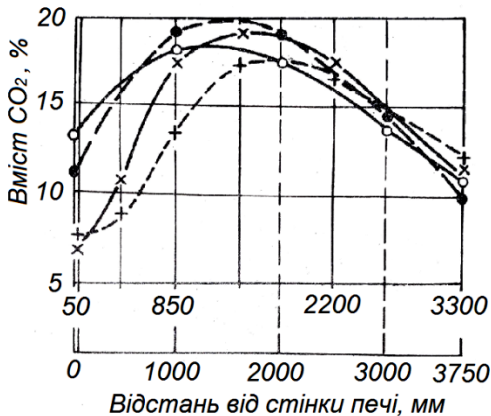


Рисунок 4 – Розподіл вмісту двоокису вуглецю по радіусу печі при різних інтенсивностях горіння сумарного вуглецю за даними А.М. Чернятіна та ін., 1966 р.: о – ДП ЧерМЗ, I_{ΣC} = 0,8 т/м³·доб; ● – та ж печ, I_{ΣC} = 0,874 т/м³·доб; x – ДП ММК, I_{ΣC} = 0,851 т/м³·доб; ++ – та ж печ, I_{ΣC} = 0,917 т/м³·доб

На відміну від розглянутих вище прикладів форсування газом доменної печі №4 ЧерМК об'ємом 2700 м³ відбувалося за рахунок перш за все центральної зони, яка є визначальною для підтримання нормального газодинамічного режиму печей подібного об'єму і більше (рис. 5). Про це свідчить різке зниження концентрації CO₂ в центрі

печі зі збільшенням інтенсивності плавки (рис. 5, в крива 2). Характерним є те, що збільшення нерівномірності радіального газорозподілу характеризувалось не тільки зниженням використання монооксиду вуглецю (рис. 5, а), але й зростанням втрат тепла як в часі (рис. 5, г), так і питомих (рис. 5, д).

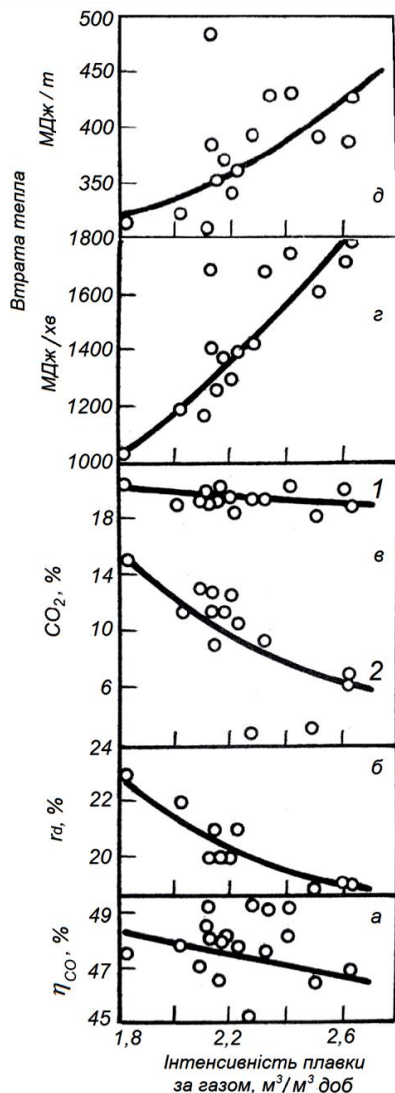


Рисунок 5 – Показники роботи доменної печі №4 ЧерМК (рф) з різною інтенсивністю плавки за даними М.П. Сисоева та ін. (1999 р.): η_{CO} – ступінь використання CO ; r_d – ступінь прямого відновлення; CO_2 – вміст CO_2 на периферії (1) і в центрі печі (крива 2)

Таким чином показано, що у випадку існування відносно незмінних сировинних умов інтенсифікація доменного процесу за будь-яким індексом відбувається за рахунок розкриття периферійно-осьових віддушин, розміри яких в перетині визначають теплову і відновлювальну роботу газового потоку та ефективність доменної плавки в цілому.

Висновки. На основі аналізу стану стовпа шихти заморожених на ходу доменних печей, що працювали з різним рівнем інтенсивності плавки, показано зміни в структурі стовпа, викликані зростанням інтенсифікації процесу. Це зростання збільшує висоту надфурменної частини коксової насадки і її загальний об'єм. При цьому збільшується кількість коксових вікон в пластичній зоні і відповідно зростає газопроникність зони. Крім того інтенсифікація зменшує або усуває окружну нерівномірність у формуванні зон когезії і коксової насадки.

Порівняння характерних періодів роботи печі об'ємом 1754 м³ дозволило встановити, що перевищення рівня інтенсивності плавки з 0,650 до 1,009 т/м³доб, тобто в півтора рази, викликало наступні зміни в радіальному газорозподілі – нерівномірність його за показником коефіцієнта варіації концентрацій CO₂ зростає в середньому з 21 до 30%, а ступінь підвантаження периферії за критерієм CO_{2п}/CO_{2ц} зменшилась з 0,89 до 0,65.

Співставлення результатів дослідження, отриманих на ДП №8 ДМК, з даними газорозподілу трьох інших доменних печей різних підприємств показало, що у випадку існування відносно незмінних сировинних умов інтенсифікація доменного процесу за будь-яким індексом відбувається за рахунок розкриття периферійно-осьових віддушин, розміри яких в перетині визначають теплову і відновлювальну роботу газового потоку та ефективність доменної плавки в цілому.

Перелік посилань

1. Доклад о разборке содержимого доменной печи №1 завода Амагасаки / К. Нарита, Т. Сато, М. Маекава, С. Фукихара, Х. Канаема, С. Сасахара // Тецу то Хагане. 1980. №13. С. 1975-1984.
2. Гуденау Г.-В., Сасабе М., Крайбих К. Исследования на охлажденных печах в Японии // Черные металлы. 1977. № 6-7. С. 13-17.
3. Количественная оценка образований в столбе шихты доменных печей / Г. Ю. Крячко, Е. Е. Барсуков, Е. Л. Мастеровенко, А. А. Седых // Збірник наукових праць ДДТУ. 2015. Вип. 2(27). С. 30-38.
4. Бочка В. В. Влияние интенсивности плавки на основные показатели работы доменных печей / Металлургическая и горнорудная промышленность. 1997. №4. С. 9-12.

References

1. Narita, K., Sato, T., Maekawa, M., Fukihara, S., Kanayama, H., & Sasahara, S. (1980). Report on the analysis of the contents of Blast Furnace No. 1 of the Amagasaki Plant. *Tetsu to Hagane*, 13, 1975–1984
2. Gudenau, H.-W., Sasabe, M., & Kraibikh, K. (1977). Research on cooled furnaces in Japan, *Ferrous Metals*, 6–7, 13–17
3. Kriachko, H. Yu., Barsukov, E. E., Masterovenko, E. L., & Sedykh, A. A. (2015). Quantitative assessment of formations in the shaft column of blast furnaces *Collection of Scientific Papers of DSTU*, 2(27), 30–38
4. Bochka, V. V. (1997). Influence of smelting intensity on the main performance indicators of blast furnaces. *Metallurgical and Mining Industry*, 4, 9–12

H. Yu. Kriachko¹, Ph. D. (Tech.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8773-508X
Ye. M. Siharov^{1,*}, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-8229-7877

¹ *Dniprovsky State Technical University*

* *Corresponding author: en_sigarev@ua.fm*

**THE RELATIONSHIP BETWEEN BLAST FURNACE SMELTING
INTENSITY, BURDEN COLUMN STRUCTURE AND RADIAL
GAS DISTRIBUTION**

Abstract. This study investigates the influence of smelting intensity on the formation of the burden column structure and radial gas distribution in blast furnace cross-sections. Based on the analysis of frozen burden columns obtained during furnace operation at different levels of smelting intensity, structural changes in the column caused by process intensification were identified. An increase in intensity leads to a higher upper part of the coke layer and a larger overall coke volume, while simultaneously increase the number of gas-conducting gaps. Furthermore, intensification diminishes arch formation in the plastic zone, there by lowering the resistance of the coke layer. A comparison of operating conditions in a 1754 m³ blast furnace at smelting intensities of 0.650 and 1.009 t/m³·day (a 1.55-fold increase) demonstrated significant structural and gas-distribution changes: the non-uniformity coefficient of radial CO₂ concentration increased from 21–30%, while the degree of CO_{2P}/CO_{2C} underutilization was decreased from 0.89 to 0.65. These findings indicate that higher smelting intensity promotes a more stable burden structure, ensuring more efficient utilization of the furnace volume (1754 m³, Dniprovskiy Metallurgical Plant). For furnaces of various capacities, a correlation was observed between process intensification and the development of peripheral–axial zones in radial gas distribution. Specifically, smelting intensity increased by 9% (per unit of coke consumption) in a 2000 m³ Cherepovets furnace and by 8% in a 1300 m³ Magnitogorsk furnace due to the activation of peripheral zones. It is emphasized that, under relatively stable external conditions, any intensification of the blast furnace process occurs through the opening of peripheral–axial channels. The cross-sectional dimensions of these channels determine the thermal and reducing capacity

of the gas flow and, ultimately, the efficiency of blast furnace operation.

Key words: blast furnace, smelting intensity, structure, burden column, radial gasdistribution, peripheral-axial channels.

For citation: Kriachko, H. Yu., & Siharov, Ye. M. (2026). The relationship between blast furnace smelting intensity, burden column structure and radial gas distribution. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 320-331. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-020>

Рукопис надійшов до редакції / Received 23.11.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026