

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ CO₂ В ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Корнілов Б.В.¹, Чайка О.Л.², Москалина А.О.³, Чайка А.О.⁴

¹Інститут чорної металургії НАН України, к. т. н, Україна

²Інститут чорної металургії НАН України, к. т. н, ст. наук. співр., Україна

³Інститут чорної металургії НАН України, к. т. н, Україна

⁴Інститут чорної металургії НАН України, Україна

Анотація. Глобальне потепління висуває перед людством виклики щодо зменшення впливу антропогенних факторів на навколишнє середовище. Тому однією з нагальних задач є декарбонізація промислового виробництва в цілому та металургійній галузі зокрема, на яку приходить 6–8% викидів CO₂. Так як доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90% що найменше до 2050 р., то зменшення викидів CO₂ з доменної печі є нагальною задачею.

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, водню та водневмісних добавок, ефекту від їх підігріву, застосування металодобавки, а також зміни технічних та технологічних параметрів доменної плавки (температура дуття, зміна вмісту FeO у шихті, теплові втрати, ступінь використання CO та H₂) на викиди CO₂ та техніко-економічні показники.

Ключові слова: доменна піч, викиди CO₂, водень, природний та коксовий газ, пилувугільне паливо, металодобавка, параметри дуття, кокс.

Вступ. У зв'язку з глобальним потеплінням та пов'язаними з ним негативними наслідками в майбутньому більшість країн світу, у тому числі й Україна, ратифікували Паризьку угоду щодо клімату (2016 р.), які зобов'язують зменшити викиди CO₂. У світовій структурі викидів CO₂ на металургію припадає 6–8% викидів CO₂.

За прогнозами Міжнародного Енергетичного Агентства (IEA) до 2050 р. доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90%, залишаючись при цьому найбільш затребуваною порівняно з іншими технологіями виробництва заліза. Нові технології отримання сталі поступово впровадяться, і це до 2050 р., за умови значних у

десятки мільярдів доларів інвестицій у реалізацію нових технологій, може призвести до зменшення традиційного способу виробництва сталі на 50%. у циклі виробництва стали дозволити зберегти конкурентоспроможність металургійної галузі в Україні та світі [1].

Основний матеріал. Для оцінки впливу потенціалу нових та існуючих технологій виробництва заліза на зменшення викидів CO_2 та техніко-економічні показники доменної плавки виконано розрахунки з використанням розробленої в ІЧМ НАНУ математичної моделі повного енергетичного балансу доменної плавки стосовно умов роботи доменної печі об'ємом 2000 м^3 .

Важливою задачею є визначення ефективності тієї чи іншої технології при впровадженні виробництва для оцінки економічного та екологічного ефекту від її застосування. Встановлено закономірності зміни та узагальнено результати ефективності застосування/зміни того чи іншого параметра на викиди CO_2 , вихід вторинних енергоресурсів (ВЕР) та витрату коксу.

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, водню та водневмісних добавок (природного (ПГ) та коксового газу (КГ)) на викиди CO_2 , вихід ВЕР та витрату коксу (табл. 1). Показано, що водень та водневмісткі добавки дозволяють більшою мірою забезпечити зменшення викидів CO_2 та коксу, збільшити вихід вторинних енергоресурсів у порівнянні з ПУТ, а саме: використання водню до $500 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити викиди CO_2 до 30%, витрату коксу до 25% та збільшити вихід ВЕР до 81%; використання природного газу до $200 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити викиди CO_2 до 15%, витрату коксу до 35% та збільшити вихід ВЕР до 74%; використання коксового газу до $300 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити викиди CO_2 до 15%, витрату коксу до 28% та збільшити вихід ВЕР до 60%[2,3].

Використання ПВП не дозволяє зменшити викиди CO_2 , а їх зменшення досягається тільки за рахунок зменшення витрати пари для підтримки теоретичної температури в заданих межах, однак може забезпечити найбільше зменшення витрати коксу (до 45% при витраті ПВП до $250 \text{ кг}/\text{т}$).

Таблиця 1

Ефективність застосування різних паливних добавок при максимальному їх застосуванні на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрати коксу

	ПВП 250 кг/т	Природний газ 200 м ³ /т	Коксовий газ 300 м ³ /т	Водень 500 м ³ /т
Викиди CO ₂	-11% (-0,44%) *	-15% (-0,75%)	-15% (-0,5%)	-30% (-0,6%)
Вихід ВЕР	-10% (-0,4%)	+74% (+3,7%)	+60% (+2%)	+81% (+1,62%)
Витрата коксу	-45% (-1,8%)	-35% (-1,75%)	-28% (-0,93%)	-25% (-0,5%)
<i>З врахування підігріву паливної добавки:</i>				
	400°C	800°C	800°C	1000°C
Викиди CO ₂	-12% (-0,48%) *	-21% (-1,05%)	-20% (-0,67%)	-40% (-0,8%)
Вихід ВЕР	-8% (-0,32%)	+64% (+3,2%)	+57% (+1,9%)	+69% (+1,38%)
Витрата коксу	-44% (-1,76%)	-40% (-2%)	-32% (-1,07%)	-31% (-0,62%)

*для ПВП досягнення зниження викидів CO₂ досягається за рахунок зменшення витрати пари для підтримки теоретичної температури в заданих межах;

** у дужках зазначено зміну параметру зі збільшенням витрати паливної добавки на 10 кг/т (м³/т).

Збільшення ВЕР (тобто збільшення енергоємності доменного газу) при використанні водневмісних паливних добавок дозволить використовувати очищений від CO₂ доменний газ в інших переділах металургійного комбінату або вдувати в фурмене вогнище доменної печі. Використання коксового газу в доменній печі може бути перехідною технологією перед використанням водню.

Підігрів газоподібних паливних добавок може дати більший ефект - до 10%, 6% та 5% зменшення викидів CO₂ відповідно та 4-6% зменшення витрати коксу за рахунок можливості до більшого нагрівання – ПГ та КГ до 800°C H₂ – до 1000°C, порівняно з ПВП – до 400°C, яке забезпечить зменшення викидів ЗІ та зменшення витрати на 1%.

Застосування водневмісних паливних добавок спільно з ПВП є актуальною задачею через поширення технології вдування ПВП як в Україні, так і за кордоном. Встановлено, що спільне вдування в горн доменної печі водневмісних добавок спільно ПВП дозволяє вирішити одночасно дві задачі – зменшення викидів CO₂ і забезпечити мінімальну собівартість чавуну та сталі. Визначено критичні витрати паливних добавок, за яких, згідно з принципом

Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямим шляхом, а отже, і мінімальної витрати палива при досягненні ступеня прямого відновлення близького до 0% (табл. 2).

Таблиця 2

Витрата палива, за якої все залізо в печі відновлюється непрямим шляхом

Параметр	ПВП+ПГ	ПВП+КГ	ПВП+H ₂
Витрата ПВП, кг/т	200-250	200-250	200-250
Витрата водневмісної добавки, кг/т	193-180	300	485-450

Робота доменної печі за змінних шихтових умов призводить до зміни технологічних параметрів, таких як теплові втрати, ступінь використання СО та H₂, що позначається на викиди CO₂ та техніко-економічні показники. Також на викиди CO₂ впливає застосування металодобавки, зміна температури дуття та вміст FeO в шихті. Встановлено граничні значення ефективності застосування металодобавки та технологічних заходів щодо збільшення температури дуття, зміни вмісту FeO у шихті, зменшення теплових втрат та збільшення ступеня використання СО та H₂ на викиди CO₂, вихід ВЕР та витрату коксу (табл. 3).

Таблиця 3

Ефективність застосування металодобавки, технічних та технологічних заходів на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрата коксу

	Метало- добавка	Вміст FeO в шихті	Темпера- тура дуття	Теплові втрати	Ступінь ви- користання СО	Ступінь ви- користання H ₂
Діапазон зміни:	0-500 кг/т	0-20%	от 1100°C до 1450°C	від 20 до 5 МВт	від 40% до 50%	від 40% до 70%
Викиди CO ₂	-47% (-0,93%)	-9,9% (-0,49%)	-6,4% (-1,82%)	-2,3% (-0,15%)	-13,2% (-1,32%)	-7,2% (-0,24%)
Вихід ВЕР	-108% (-2,16%)	-10,3% (-0,52%)	-26,5% (-7,6%)	-0,4% (-0,03%)	-48,4% (-4,84%)	-29% (-0,97%)
Витрата коксу	-16% (-0,33%)	-12% (-0,6%)	-2% (-0,49%)	-0,6% (-0,04%)	-11,9% (-1,19%)	-6,4% (-0,21%)

* у дужках зазначено зміну впливу збільшення витрати металодобавки на 10 кг/т, температури дуття на 100°C, ступеня використання СО і H₂ та вмісту FeO в шихті на 1% та зменшення теплових втрат на 1 МВт.

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування паливних добавок, застосування металодобавки, а також зміни

технічних та технологічних параметрів доменної плавки на викиди CO_2 та техніко-економічні показники: використання чистих металодобавок в доменній печі дозволяє суттєво зменшити викиди CO_2 , однак їх використання обмежене наявністю та ціною; збільшення температури дуття на кожні 100°C дозволить зменшити викиди CO_2 на 1,8% та витрату коксу на 0,5%; збільшення ступеню використання CO та H_2 в доменній печі на кожен 1% дозволить зменшити викиди CO_2 на 1,3% та 0,25% відповідно; збільшення частки FeO в шихті в доменній печі на кожен 1% дозволить зменшити викиди CO_2 на 0,5%; зменшення теплових втрат в системі охолодження на кожен 1 МВт дозволить зменшити викиди CO_2 на 0,15%.

Висновки

1. Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, водню та водневмісних добавок (природного та коксового газу) на викиди CO_2 , вихід ВЕР та витрату коксу, в тому числі і з врахуванням їх підігріву. Показано, що водень та водневмісткі добавки дозволяють більшою мірою забезпечити зменшення викидів CO_2 та збільшити вихід вторинних енергоресурсів у порівнянні з ПВП.

2. Визначено критичні витрати паливних добавок, за яких, згідно з принципом Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямым шляхом.

3. Встановлено граничні значення ефективності застосування металодобавки, а також зміни технічних та технологічних параметрів доменної плавки (температура дуття, зміна вмісту FeO у шихті, теплові втрати, ступінь використання CO та H_2) на викиди CO_2 та техніко-економічні показники.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аналіз тенденцій розвитку уявлень та технологій, спрямованих на зменшення емісії діоксиду вуглецю в доменному виробництві. Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Меркулов О. Є., Москалина А. О., Лебідь В. В., Ізюмський М. М. *Метал і лиття України*. 2022. № 2 (329). С. 8–19. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
2. Nathan Barrett, Subhasish Mitra, Hamid Doostmohammadi, Damien O’dea, Paul Zulli, Sheng Chew, Tom Honeyands. Assessment of Blast Furnace Operational Constraints in the

Presence of Hydrogen Injection. ISIJ International. 2022, Vol. 62 Iss. 6, P. 1168-1177. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-574>

3. Prospects for the Use of Hydrogen and Hydrogen-Containing Additives to Reduce CO₂ Emissions and to Improve the Performance of Blast Furnace Smelting. Chaika O., Kornilov B., Myravyova I., Moskalyna A., Lebid V., Ivancha M. (2024). Science and Innovation, 20(5), 35–52. <https://doi.org/10.15407/scine20.05.035>

ANALYSIS OF OPPORTUNITIES FOR REDUCING CO₂ EMISSIONS IN BLAST FURNACE PRODUCTION

Kornilov B.V., Chaika O.L., Moskalyna A.O., Dzhygota M.G.

Abstract. *Global warming poses challenges for humanity to reduce the impact of anthropogenic factors on the environment. Therefore, one of the urgent tasks is the decarbonization of industrial production in general and the metallurgical industry in particular, which accounts for 6–8% of CO₂ emissions. Since blast furnace production will remain the dominant link in steel production, as it is the most economically advantageous with a thermal efficiency of up to 90% at least by 2050, reducing CO₂ emissions from the blast furnace is an urgent task.*

The limiting values of the efficiency of using technologies for blowing PCI, hydrogen and hydrogen-containing additives, the effect of their heating, the use of metal additives, as well as changes in the technical and technological parameters of blast furnace smelting (blow temperature, change in the FeO content in the charge, heat losses, degree of use of CO and H₂) on CO₂ emissions and technical and economic indicators have been established.

Keywords: *blast furnace, CO₂ emissions, hydrogen, natural and coke oven gas, PCI, metal additive, blast parameters, coke.*

REFERENCE

1. Analiz tendentsii rozvytku uiavlennia ta tekhnolohii, spriamovanykh na zmenshennia emisii dioksydu vuhletsu v domennomu vyrobnytstvi. Chaika O.L., Kornilov B.V., Merkulov O.Ye., Moskalyna A.O., Lebid V.V., Iziumskyi M.M. Metal i lyttia Ukrainy. – 2022. № 2 (329). S. 8–19. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>
2. Assessment of Blast Furnace Operational Constraints in the Presence of Hydrogen Injection. Nathan Barrett, Subhasish Mitra, Hamid Doostmohammadi, Damien O’dea, Paul Zulli, Sheng Chew, Tom Honeyands. ISIJ International. 2022, Vol. 62 Iss. 6, P. 1168-1177. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-574>
3. Prospects for the Use of Hydrogen and Hydrogen-Containing Additives to Reduce CO₂ Emissions and to Improve the Performance of Blast Furnace Smelting. Chaika O., Kornilov B., Myravyova I., Moskalyna A., Lebid V., Ivancha M. (2024). Science and Innovation, 20(5), 35–52. <https://doi.org/10.15407/scine20.05.035>