



JEL: L610

DOI: 10.62911/ete.2024.02.01.09

Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 2. The technology of joint loading of lumpy anthracite and fluxed local specs


Citation:

Chuprynov, Y., Kassim, D., Shmeltser, K., Lykhova, I., & Renkas, O. (2024). Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 2. The technology of joint loading of lumpy anthracite and fluxed local specs. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering". Vol. 2 No. 1 (2024), 107–118. <https://doi.org/10.62911/ete.2024.02.01.09>

Yevhen Chuprynov

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: chuprynov.yv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-8605-3434

Daria Kassim

Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: kassim@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0002-1750-1237

Kateryna Shmeltser

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-6830-8747

Iryna Liakhova

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: liakhova.ia@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0001-7589-8351

Olha Renkas

Student, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: renkas.olya.2002@gmail.com

 ORCID iD: 0009-0005-7890-4434

Abstract: The article analyzes the reasons for the growing research interest in the technology of loading lump anthracite of different fractions into a blast furnace to increase its efficiency. It is shown that loading blast furnaces with additional lump anthracite can be an effective way to improve the technical and economic indicators of their operation, especially on furnaces that work without the technology of pulverized fuel injection. It was noted that the traditional directions of development of iron smelting technology in blast furnaces practically mastered. At the same time, the problem of improving the quality of iron ore raw materials has not yet been fully resolved. A conclusion was made about the need for a new type of iron ore raw material, which would combine the best properties of agglomerate and pellets and would not have their negative features. A number of technologies for the production of a new type of iron ore raw material have been developed - fluxed local specs from iron ore concentrates of various degrees of enrichment, with an increased iron content compared to agglomerate and pellets and with an increased residual carbon content. A comparison of technological parameters of production and metallurgical characteristics of agglomerate, pellets and the developed unfluxed mono-raw material was made. If two technologies are combined: loading of lump anthracite into the blast furnace for partial replacement of coke and mono-raw material, namely, local specs with a high content of iron and residual carbon, then analytical estimates show that, for example, when loading into furnace No. 9 with useful volume of 5000 m³ up to 70 kg/t of lump anthracite, blowing up to 60 m³/t of natural gas and using local specs with a residual carbon of 2.85 % and an iron content of 70.45 %, it is possible to reduce coke consumption to 322.68 kg/t of cast iron and increase furnace productivity to 12733 t/day, which can be compared with the best indicators achieved in the world when blowing PCI, but without large capital costs.

Keywords: pulverized coal; anthracite; sinter; pellets; fluxed local specs; coke consumption.

Received: 12/03/2024

Accepted: 08/04/2024




JEL: L610

**Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces.
Part 2. The technology of joint loading of lumpy anthracite and fluxed local specs**

Yevhen Chuprynov

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-8605-3434

Daria Kassim

Prof., DSc, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: kassim@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-1750-1237

Kateryna Shmeltser

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Iryna Lyakhova

Assoc. Prof., PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine


e-mail: liakhova_ia@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7589-8351

Olha Renkas

Student, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: renkas.olya.2002@gmail.com

 ORCID ID: 0009-0005-7890-4434

Abstract: The article analyzes the reasons for the growing research interest in the technology of loading lump anthracite of different fractions into a blast furnace to increase its efficiency. It is shown that loading blast furnaces with additional lump anthracite can be an effective way to improve the technical and economic indicators of their operation, especially on furnaces that work without the technology of pulverized fuel injection. It was noted that the traditional directions of development of iron smelting technology in blast furnaces practically mastered. At the same time, the problem of improving the quality of iron ore raw materials has not yet been fully resolved. A conclusion was made about the need for a new type of iron ore raw material, which would combine the best properties of agglomerate and pellets and would not have their negative features. A number of technologies for the production of a new type of iron ore raw material have been developed - fluxed local specs from iron ore concentrates of various degrees of enrichment, with an increased iron content compared to agglomerate and pellets and with an increased residual carbon content. A comparison of technological parameters of production and metallurgical characteristics of agglomerate, pellets and the developed unfluxed mono-raw material was made. If two technologies are combined: loading of lump anthracite into the blast furnace for partial replacement of coke and mono-raw material, namely, local specs with a high content of iron and residual carbon, then analytical estimates show that, for example, when loading into furnace No. 9 with useful volume of 5000 m³ up to 70 kg/t of lump anthracite, blowing up to 60 m³/t of natural gas and using local specs with a residual carbon of 2.85 % and an iron content of 70.45 %, it is possible to reduce coke consumption to 322.68 kg/t of cast iron and increase furnace productivity to 12733 t/day, which can be compared with the best indicators achieved in the world when blowing PCI, but without large capital costs.


Keywords: pulverized coal; anthracite; sinter; pellets; fluxed local specs; coke consumption

Підвищення ефективності доменної плавки в залежності від умов роботи доменних печей. Частина 2. Технологія спільного завантаження кускового антрациту і офлюсованих локальних спеків

Євген Чупринов

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: chuprynov_yv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-8605-3434

Дар'я Кассім

професор, д.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: kassim@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0002-1750-1237

Катерина Шмельцер

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: shmeltser@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0001-6830-8747

Ірина Ляхова

доцент, к. т. н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна


e-mail: liakhova_ia@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0001-7589-8351

Ольга Ренкас

студентка, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: renkas.olya.2002@gmail.com

 ORCID ID: 0009-0005-7890-4434

Анотація: У статті проаналізовані причини зростання дослідницького інтересу щодо технології завантаження кускового антрациту різної фракції в доменну піч для підвищення ефективності її роботи. Показано, що завантаження доменних печей додатковим кусковим антрацитом може бути ефективним способом покращення техніко-економічних показників їх роботи, особливо на печах, які працюють без технології вдування пиловугільного палива. Відзначено, що традиційні напрямки розвитку технології виплавки чавуну у доменних печах практично освоєно. При цьому проблема підвищення якості залізорудної сировини повною мірою поки що не вирішена. Виконаний порівняльний аналіз традиційних видів залізорудної сировини. Розроблено низку технологій виробництва нового виду залізорудної сировини – офлюсованих локальних спеків із залізорудних концентратів різного ступеня збагачення, з підвищеним, порівняно з агломератом та окатишами, вмістом заліза та залишкового вуглецю. Виконано порівняння технологічних параметрів виробництва та металургійних характеристик агломерату, окатишів і розробленої офлюсованої моносіровини. Якщо поєднати дві технології: завантажити в доменну піч кускового антрациту для часткової заміни коксу та моносіровини – локальних спеків із підвищеним вмістом заліза та залишкового вуглецю, то аналітичні оцінки показують, що, наприклад, при завантаженні у піч №9 корисним об'ємом 5000 м³ до 70 кг/т шматкового антрациту, вдуванні до 60 м³/т природного газу та використанні локальних спеків з залишковим вуглецем 2,85 % та вмістом заліза 70,45 % можливе скорочення витрати коксу до 322,68 кг/т чавуну та збільшення продуктивності печі до 12733

т/добу, це можна порівняти з кращими показниками, досягнутими у світі при вдуванні ПВП, але без великих капітальних витрат.

Ключові слова: пиловугільне паливо; антрацит; агломерат; окатиші; офлюсовані локальні спеки; витрата коксу

Вступ (Introduction)

За останні роки спостерігається зростання дослідницького інтересу до використання антрациту різної фракції для підвищення ефективності доменної плавки, про що свідчить низка публікацій на цю тему (Yang, 2021, Li, 2022, Shen, 2016). В розрізі представленої роботи найбільший інтерес представляє технологія використання саме кускового антрациту. Завантаження доменних печей додатковим кусковим антрацитом може зменшити споживання коксу, особливо при роботі доменної печі без технології вдування пиловугільного палива, і це може бути ефективним у покращенні техніко-економічних показників роботи підприємства за певних експлуатаційних обмежень (Lyalyuk, 2017), (Ren, 2013), (Amdur., 2008). При оптимальній кількості антрациту та правильній схемі завантаження залізовмісної частини шихти покращуються властивості саморозм'якшення та плавлення шихти, відповідаючи вимогам виробництва чавуну без шкоди для продуктивності печі (Lyalyuk, 2016).

Велику роль відіграє і співвідношення паливних компонентів поза залежністю від їх фракції. Антрацит, коксовий дріб'язок та інші марки тонкоподрібненого вугілля мають різні властивості, які впливають на їхню придатність для вдування в доменну піч, причому антрацит демонструє сприятливі характеристики горіння та реакційну здатність при правильному співвідношенні у суміші з іншими паливними добавками (Jin, 2021). Щодо кускового антрациту, то збільшення його частки в паливній частині шихти впливає на процеси згорання палива та викиди в атмосферу, причому, при співвідношенні 65:35 між коксом і антрацитом спостерігаються оптимальні показники роботи доменної печі при номінальних рудних навантаженнях, а співвідношення 75:25 рекомендовано для стабільної роботи при низьких рудних навантаженнях (Shengli, 2009).

Беззаперечна ефективність технології використання кускового антрациту була доведена в першій частині представленої дослідження (Chuprynov, 2023).

Основні напрямки розвитку технології виплавки чавуну у доменних печах були визначені ще у минулому столітті. До них відносили збільшення об'єму доменних печей, підвищення температури гарячого дуття, збагачення дуття киснем, підвищення тиску газу на колошнику, вдування в піч природного та коксового газів, мазуту та пиловугільного палива, оптимізацію розподілу шихтових матеріалів на колошнику із застосуванням нових завантажувальних пристроїв, вдосконалення розподілення газового потоку в горні доменної печі, автоматизацію доменної плавки. В даний час зазначені вище основні напрямки розвитку технології виплавки чавуну у доменних печах практично освоєно.

Проблема підвищення якості залізорудної сировини повною мірою поки що не вирішена. Корінне поліпшення рудопідготовки до рівня, що відповідає вимогам сучасного доменного виробництва, є одним із найважливіших завдань, так як вирішення цієї проблеми є визначальною умовою досягнення високих технічних та економічних показників виробництва чавуну (Liu, 2015).

У цьому напрямку цікавими є не тільки останні розробки в напрямку покращення якості традиційних видів залізорудної сировини – агломерату та окатишів (Cavaliere, 2014), Kawanari, 2011), (Kasai, 2011), але і технології виробництва і застосування нових видів підготовленої залізорудної сировини, яка б мала певні переваги над агломератом та окатишами, і в той же час не мала б їх негативних рис. Наприклад, перспективною є технологія використання залізорудних вуглецевмісних брикетів із нанорозмірними частинками Fe_2O_3 , що може значно збільшити швидкість відновлення заліза та призведе до підвищення енергоефективності в доменній печі (Koichi, 2015).

Окрім вирішення проблем раціонального вибору заміників коксу (Jianliang, 2023),

(Raygan, 2010), (van Straaten, 2019), перспективи підвищення ефективності доменної плавки значною мірою визначаються удосконаленням технологій підготовки залізородної сировини. Враховуючи вищесказане, підвищення ефективності доменних печей може бути досягнуто шляхом поєднання декількох технологічних рішень – завантаження кускового антрациту та застосування нових видів залізородної сировини.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

У процесі дослідження був проведений аналіз літератури щодо аспектів застосування технології вдування пиловугільного палива, завантаження кускового антрациту і використання альтернативних методів зменшення витрат коксу. Для співставлення ефективності різних технологій виконані розрахунки та зроблене порівняння техніко-економічних показників роботи доменних печей №6, №7 (корисним об'ємом 2000 м³) і №9 (корисним об'ємом 5000 м³) при використанні в шихті антрациту та офлюсованої моносировини – локальних спеків з підвищеним вмістом заліза та вуглецю.

Результати (Results)

На ПАТ "Арселорміттал - Кривий Ріг" планується будівництво фабрики з виробництва окатишів з метою виведення з експлуатації старих цехів з виробництва агломерату. Фабрика буде виробляти окатиші основністю 0,4-0,5 д.од. Планується використання в шихті доменної печі №9 до 70 % обпалених окатишів.

Як відомо, порівняно з агломератом, окатиші мають переваги: однорідність форми у кілька разів нижчий вміст дріб'язку, більш високий вміст заліза. Однак ці переваги окатишів реалізуються не повною мірою, що пов'язано з технологічною неможливістю виробництва окатишів необхідної основності (1,2-1,3 д.од.), при виготовленні із залізородного концентрату з вмістом SiO₂ ≥ 5 % через вузький інтервал температур їх плавлення під час термозміцнення, несприятливих особливостей їхньої поведінки в процесі завантаження в доменну піч, а також при відновленні та плавленні в доменній печі.

У процесі завантаження в піч окатиші, що мають найменший кут природного укосу з усіх кускових компонентів шихти (кокс, агломерат і багата кускова руда) і високу сипучість, менш рівномірно розподіляються на колошнику доменної печі, на відміну від агломерату, що знижує рівномірність розподілення шихти, і відповідно, газу по перерізу доменної печі. У той же час газопроникність окремо взятого шару окатишів нижче газопроникності однакового з ним шару агломерату, що пов'язано з утворенням частинками кулястої форми більш щільної упаковки. Гідравлічний опір нерухомого шару окатишів у чотири рази більший за опір такого ж шару шихти в доменній печі.

Використання в складі шихти доменних печей великої кількості залізородних окатишів досить часто призводить до розвитку периферійного ходу печі, зниження стійкості засипних апаратів, до утворення нестійкого "гарнісажу"; збільшення швидкості руйнування вогнетривкої футерівки, суттєвого зростання кількості прогарів холодильників, а також місцевим розігрівом та розривом кожухів у нижній частині шахти, розпарі та заплічниках. Періодичні руйнування "гарнісажу" спричиняють масовий вихід з експлуатації повітряних фурм і навіть амбразур.

Кут природного укосу окатишів на 8-10° менше кутів укосу агломерату і коксу. У зв'язку з тим, що окатиші мають велику текучість, при завантаженні в піч вони часом розташовуються на колошнику не там, куди їх намагаються завантажити технологи, а зосереджуються в пониженні профілю засипу. Якщо швидкість руху матеріалів вище біля стін, збільшення частки окатишів у шихті призводить до "підвантаження" периферійної частини печі, а при більшій швидкості опускання шихтових матеріалів в осьовій зоні окатиші зосереджуються в центрі. І в тому, і в іншому випадку порушуються газодинамічний, тепловий та шлаковий режими доменної плавки.

Крім того, використання в шихті неофлюсованих і низькоосновних обпалених окатишів спільно з високоосновним агломератом призводить до суттєвої нерівномірності фізичних характеристик залізорудних матеріалів у високотемпературній в'язко-пластичній зоні стану матеріалів у доменній печі, викликаючи підвищення нижнього перепаду тиску і створюючи загрози нижніх підвисань. Виробляти ж обпалені окатиші з необхідними для доменної печі основністю (1,2-1,3 д.од.) і оптимальними металургійними характеристиками із залізорудних концентратів із вмістом $\text{SiO}_2 \geq 5\%$ технологічно неможливо.

Все перераховане вимагає використання спеціальних прийомів завантаження окатишів, особливо при їх частці в залізорудній частині шихти до 70 %, як це планується на доменній печі №9 ПАТ АМКР. Це додатково посилить периферійний потік газу з негативними наслідками, що впливають звідси, як є і без того серйозними при використанні на печі технології з вдуванням пиловугільного палива.

Свого часу після проведення на комбінаті "Криворіжсталь" низки науково-дослідних робіт Криворізьким факультетом ДМетІ та інститутом "Механобрчормет" було розроблено технологію раціонального завантаження кислих окатишів у суміші з агломератом. Ця технологія дозволила збільшити кількість окатишів у шихті доменної печі №9 до 40-50 %, але перевищення цього співвідношення, навіть за розробленою технологією, призводило до розладу ходу такої великої печі (Lyalyuk, V., 2021).

Для ефективної роботи доменної печі потрібен однорідний за хімічним складом та крупністю повністю офлюсований ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,2-1,3$ д.од. для виключення завантаження в піч вапняку), окускований (10-60 мм) залізорудний матеріал з економічно доцільним високим вмістом заліза, з максимально досяжним при конкретному виробництві матеріалу вмістом залишкового вуглецю, мінімальним вмістом кремнезему та шкідливих домішок та з оптимальним вмістом корисних добавок. Такою моносировиною для доменної плавки можуть бути офлюсовані залізорудні локальні спеки (рис. 1), розроблені за участі авторів цієї статті.



Рисунок 1. Офлюсовані локальні спеки

Розроблено низку технологій виробництва нового виду залізорудної сировини – офлюсованих локальних спеків із залізорудних концентратів різного ступеня збагачення, з підвищеним, порівняно з агломератом та окатишами, вмістом заліза та з підвищеним вмістом залишкового вуглецю. Розроблено також технологію виробництва комплексного огрудкованого залізорудного матеріалу з підвищеним вмістом заліза та залишкового вуглецю – залізовмісної повністю офлюсованої моносировини для доменної плавки, що володіє

кращими металургійними властивостями, притаманними окремо агломерату та окатишам (Lyalyuk, 2021).

Сутність нової технології полягає в підготовці трьох шихт: двох з високою (вище 1500 °С) і однією з низькою (нижче 1250 °С) температурами плавлення, з яких після роздільного огрудування складається суміш для подальшої термообробки та отримання локальних спеків.

В якості високотемпературної шихти використовувалися металізовані окатиші, руди або їх суміш зі ступенем металізації 5-95 % крупністю до 0-18 мм, а також тверде паливо (антрацит) крупністю 0-18 мм, попередньо оброблене реагентом для підвищення гідрофільності його поверхні. Співвідношення між цими матеріалами підтримувалося в діапазонах 10-90 % металізованого матеріалу та 90-10 % антрациту, залежно від заданого вмісту заліза та вуглецю в готовому продукті.

На поверхню кожного з цих матеріалів накочувалась оболонка товщиною 4-8 мм з низькоосновної, високотемпературної тонкоподрібненої шихти (залізорудний концентрат, магнезійний флюс, бентоніт) до досягнення крупності сирих окатишів 8-25 мм.

Низькотемпературна шихта складалася із залізорудного концентрату, флюсу – вапняку, що забезпечує необхідну (1,2-1,3 д.од.) основність всього готового продукту (локальних спеків) та бентоніту. З цієї шихти отримували сирі окатиші крупністю 8-14 мм. Високо- і низькотемпературні сирі окатиші змішувалися при вмісті в суміші суми перших 55-88 % і других – 45-12 %, після чого піддавалися термообробці за традиційним режимом термозміцнення окатишів.

У табл. 1 наведені порівняльні технологічні параметри виробництва та металургійні характеристики, вироблених промисловістю агломератів і окатишів, а також розробленої доменної залізорудної офлюсованої моносировини. Випробування показали, що при виробництві доменної моносировини – локальних спеків на обпалювальній конвеєрній машині для термозміцнення окатишів питома продуктивність агрегату вище, ніж у виробництві агломерату та обпалених окатишів, а питомі витрати енергоресурсів нижчі.

Таблиця 1. Технологічні показники виробництва та металургійні характеристики огрудованих залізорудних матеріалів доменної плавки

Показники	Промислові огрудовані матеріали, що виробляються		Залізорудна моносировина – офлюсовані локальні спекі з підвищеним вмістом заліза та вуглецю
	Промислові офлюсовані агломерати в різних країнах	Промислові неофлюсовані та офлюсовані окатиші в різних країнах	
Питома продуктивність, т/(м ² ·год)	1,1-1,4	0,8-1,2	1,1-1,7
Питома витрата теплоти, МДж/т	1947-2452	367-840	391-728
Питома витрата електроенергії, квт·год/т	43,1-71,3	38,7-69,5	37,2-59,5
Вміст, %:			
Fe _{заг.}	51,2-64,1	61,5-65,8	63,5-75,6
FeO	9,1-15,6	1,3-5,4	7,6-15,7
SiO ₂	3,7-10,4	0,9-7,7	2,1-4,3
вуглецю	0	0	1,6-3,8
Основність (CaO/SiO ₂) готового продукту, д.од.	1,2-1,8	0,03-1,25	1,25-1,5
Вміст класів, %:			
60-100 мм	23,7-35,6	0	0
20-60 мм	34,3-55,9	0	84,5-71,8
5-20 мм	12,3-7,8	94,8-98,2	13,1-24,8
0-5 мм	20,4-8,1	5,2-1,8	2,2-3,4
Міцність на стиснення, кН/ок. (ДСТУ ISO 4700:2005)	не визначається	1,8-3,8	не визначається
Міцність в барабані, % (ДСТУ ISO 3271:2005):			
на удар (+5 мм)			
стиранність (0-0,5 мм)	57,4-93,1	92,4-97,1	95,8-96,5

	13,6-2,6	5,8-1,1	3,2-2,7
Міцність при відновленні, % (ДСТУ 3202-95):			
міцність (+5 мм)	37,8-62,2	53,5-95,8	89,9-93,2
стиранність (0-0,5 мм)	10,4-9,8	4,7-2,1	6,3-3,9
Газопроникність та усадка шару при відновленні, (ДСТУ 3205-95):			
усадка шару, %	15-18	12-67	13-19
перепад тиску, Па	68-71	108-154	60-72
Кінцевий ступінь відновлення, % (ДСТУ 3204-95)	65,1-96,0	72,8-91,4	85,3-87,4
Кут природного укосу, град.	38-41	23-32	36-42

Окислення дрібних (0-1,5 мм) частинок металізованих матеріалів і твердого палива, який знаходяться в оболонці, і не є зародками окатишів, знижувало вміст кисню в теплоносії, що дифундував всередину окатишу. Крім того, при збільшенні швидкості нагрівання та охолодження від 100 до 500-600 °С/хв в окислювальній атмосфері процесу термообробки ступінь окислення заліза металізованих матеріалів та вуглецю твердого палива всередині накатаної оболонки навіть знижувалися. Тому вміст заліза та залишкового вуглецю в готовому продукті був підвищеним. Слід зазначити, що розроблена моносировина може вироблятися в діючих цехах за основною технологією виробництва обпалених окатишів із невеликою їх реконструкцією.

Якщо поєднати дві технології: завантаження в доменну піч кускового антрациту для часткової заміни коксу та моносировини – локальних спеків із підвищеним вмістом заліза та залишкового вуглецю, то аналітичні оцінки показують, що, наприклад, при завантаженні у піч №9 корисним об'ємом 5000 м³ до 70 кг/т кускового антрациту, вдуванні до 60 м³/т природного газу та використанні локальних спеків з залишковим вуглецем 2,85 % та вмістом заліза 70,45 % можливе скорочення витрати коксу до 322,68 кг/т чавуну та збільшення продуктивності печі до 12733 т/добу, що можна порівняти з кращими показниками, досягнутими у світі при вдуванні ПУТ, але без великих капітальних витрат (табл. 2).

Таблиця 2. Розрахункові техніко-економічні показники роботи доменної печі №9 при використанні в шихті антрациту та офлюсованої моносировини – локальних спеків із підвищеним вмістом заліза та вуглецю

Показники	ДП №9			
	База	Розрах.	±К, кг/т	±П, т/добу
Продуктивність, т/добу	9826			
Приведена продуктивність, т/добу		12733		
Витрати коксу, кг/т	426,8			
Приведені витрати коксу, кг/т		322,7		
Витрати антрациту, кг/т	56	70	-12,6	
Вміст вуглецю в локальних спеках, %	0	2,85		
Кількість залишкового вуглецю в локальних спеках, кг/т	0	46,4	-37,12	
Вміст Fe у всій шихті, %	54,9	70,45	-66,4	+2597
Дуття: витрата, м ³ /хв	7812			
тиск, кПа (надл.)	337			
температура, °С	1090			
Витрати природного газу (ПГ), м ³ /т	87,1	60	+21,7	
Витратні коефіцієнти, кг/т:				
залізна руда	0	0		
агломерат АЦ №1	134,4	0		
агломерат АЦ №2	1192	0		
окатиші ПівніГЗК	300,3	0		
скрап металевий	51,3	0		
шлак збагачений	56,4	0		
вапняк	28,0	0		
локальні спеки	0	1626,7	-5,97	+137,56

Основність шлаку, д.од.	1,22			
Якість коксу, %: волога	3,73			
зола	11,2			
сірка	0,63			
M25	87,6			
M10	7,0			
+80 мм	7,9			
-25 мм	3,6			
CSR	54,9			
CRI	31,3			
Фракція -5 мм %: агломерат АЦ №1	17,96	0		
агломерат АЦ №2	4,8	0		
окатиші ПівніГЗК	3,98	0		
локальні спеки	0	3,98		
Середньозважена фракція -5 мм, %	5,73	3,98	-3,73	+171,9

Аналогічно на печі №7 корисним об'ємом 2000 м³ можливе скорочення витрати коксу до 310,8 кг/т чавуну та збільшення продуктивності печі до 4730,4 т/добу (табл. 3), а на печі №6 (тим же корисним об'ємом) можливе аналогічне скорочення витрат коксу до 317,4 кг/т чавуну та збільшення продуктивності печі до 4665,5 т/добу (табл. 4).

Таблиця 3. Розрахункові техніко-економічні показники роботи доменної печі №7 при використанні в шихті антрациту та офлюсованої моносировини – локальних спеків із підвищеним вмістом заліза та вуглецю

Показники	ДП №7			
	База	Розрах.	±К, кг/т	±П, т/добу
Продуктивність, т/добу	3570			
Наведена продуктивність, т/добу		4730,4		
Витрати коксу, кг/т	430,2			
Наведена витрата коксу, кг/т		310,8		
Витрати антрациту, кг/т	61,9	70	-7,29	
Вміст вуглецю в локальних спеках, %	0	2,85		
Кількість залишкового вуглецю в локальних спеках, кг/т	0	53,5	-42,8	
Вміст Fe у всій шихті, %	56,08	70,45	-61,8	+872,0
Дугтя: витрата, м ³ /хв	3363			
тиск, кПа (надл.)	236			
температура, °С	1028			
Витрати природного газу (ПГ), м ³ /т	72,3	60	+9,84	
Витратні коефіцієнти, кг/т:				
залізна руда	4,3	0		
агломерат АЦ №1	1560,6	0		
агломерат АЦ №2	317,0	0		
окатиші ПівніГЗК	0	0		
скрап металевий	35,8	0		
шлак збагачений	0	0		
вапняк	14,6	0		
локальні спеки	0	1877,6	-3,14	+52,1
Основність шлаку, д.од.	1,14			
Якість коксу, %: волога	4,3			
зола	11,8			
сірка	0,5			
M25	85,8			
M10	8,2			
+80 мм	7,6			
-25 мм	7,0			
CSR	54,5			
CRI	32,9			
Фракція -5 мм %: агломерат АЦ №1	11,41	0		
агломерат АЦ №2	6,92	0		

окатиші ПівнГЗК	–	0		
локальні спеки	3,98	3,98		
Середньозважена фракція -5 мм, %	10,6	3,98	-14,24	+236,3

Таблиця 4. Розрахункові техніко-економічні показники роботи доменної печі №6 при використанні в шихті антрациту та офлюсованої моносировини – локальних спіків із підвищеним вмістом заліза та вуглецю

Показники	ДП №6			
	База	Розрах.	±К, кг/т	±П, т/добу
Продуктивність, т/добу	3571			
Наведена продуктивність, т/добу		4665,5		
Витрата коксу, кг/т	426,5			
Наведені витрати коксу, кг/т		317,4		
Витрати антрациту, кг/т	58,3	70	-10,53	
Вміст вуглецю в локальних спеках, %	0	2,85		
Кількість залишкового вуглецю у локальних спеках, кг/т	0	48,4	-38,72	
Вміст Fe у всій шихті, %	56,3	70,45	-60,3	+859,0
Дуття: витрата, м ³ /хв	3001			
тиск, кПа (надл.)	226			
температура, °С	1013			
Витрати природного газу (ПГ), м ³ /т	78,5	60	+14,8	
Витратні коефіцієнти, кг/т:				
залізна руда	12,9	0		
агломерат АЦ №1	1308,3	0		
агломерат АЦ №2	390,9	0		
окатиші ПівнГЗК	0	0		
скрап металевий	37,2	0		
шлак збагачений	0	0		
вапняк	1,9	0		
локальні спеки	0	1699,2	-0,4	+3,39
Основність шлаку, д.од.	1,12			
Якість коксу, %:				
волога	3,9			
зола	11,8			
сірка	0,5			
M25	86,2			
M10	8,0			
+80 мм	6,9			
-25 мм	7,1			
CSR	55,4			
CRI	33,8			
Фракція -5 мм %:				
агломерат АЦ №1	11,5	0		
агломерат АЦ №2	7,05	0		
окатиші ПівнГЗК	–	0		
локальні спеки	3,98	3,98		
Середньозважена фракція -5 мм, %	10,48	3,98	-13,9	+232,1

Висновки (Conclusions)

У даний час технологія доменної плавки з вдуванням пиловугільного палива забезпечує у світовій практиці найвищі техніко-економічні показники роботи доменних печей, однак у зв'язку з високими капітальними вкладеннями при впровадженні технології з вдуванням ПВП вона стає економічно ефективною при мінімальній питомій витраті пиловугільного палива 200 кг/т чавуну, що технологічно важко досягти. Крім цього для її використання необхідне забезпечення плавки якісними коксом та залізородною сировиною, що також пов'язано з підвищеними витратами. Виконані дослідження показали, що технологія спільного завантаження кускового антрациту і офлюсованих локальних спіків заданої основності з залишковим вуглецем і підвищеним вмістом заліза спільно з вдуванням обмеженої кількості природного газу може конкурувати за витратою коксу з кращими результатами, досягнутими

при вдуванні пиловугільного палива, але при цьому економічні та технологічні ризики мінімальні.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, К.Д., Ч.Є. та Ш.К.; формальний аналіз, Ш.К.; методологія, Л.І. та К.Д.; візуалізація, Ч.Є. та Р.О.; оригінальна чернетка, К.Д. та Ч.Є.; перегляд і редагування, Л.І та Р.О. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література (References)

- Amdur, A., Shibanova, M., & Ental'tsev, E. (2008). Thermal-destruction products of coal in the blast-furnace gas-purification system. *Steel in Translation*, 38, 844-848. <https://doi.org/10.3103/S0967091208100136>.
- Cavaliere, P., & Perrone, A. (2014). Optimization of Blast Furnace Productivity Coupled with CO₂ Emissions Reduction. *Steel research international*, 85. <https://doi.org/10.1002/srin.201300027>.
- Chuprynov, Y., Kassim, D., Shmeltser, K., Liakhova, I., Renkas, O. (2023). Increasing the efficiency of the furnace depending on the operating conditions of the furnaces. Part 1. Technology of loading of lumped anthracite and natural gas injection. *Economics and Technical Engineering*, 1(1), 134-146. <https://ete.org.ua/index.php/journal/article/view/83>
- Jianliang, Z., Kuangdi, X. (2023). Pulverized Coal Injection of Blast Furnace Ironmaking. In: Xu, K. (eds) *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_1047-1
- Jin, L., & Niu, X. (2021). Micromorphology and safety properties of meager and meager-lean coal for blast furnace injection. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 774 - 781. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2104-2>.
- Kasai, A., Toyota, H., Nozawa, K., & Kitayama, S. (2011). Reduction of Reducing Agent Rate in Blast Furnace Operation by Carbon Composite Iron Ore Hot Briquette. *Isij International*, 51, 1333-1335. <https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.51.1333>.
- Kawanari, M., Matsumoto, A., Ashida, R., & Miura, K. (2011). Enhancement of Reduction Rate of Iron Ore by Utilizing Iron Ore/Carbon Composite Consisting of Fine Iron Ore Particles and Highly Thermoplastic Carbon Material. *Isij International*, 51, 1227-1233. <https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.51.1227>.
- Koichi, T., Nouchi, T., Sato, M., & Ariyama, T. (2015). Perspective on Progressive Development of Oxygen Blast Furnace for Energy Saving. *Isij International*, 55, 1866-1875. <https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.ISIJINT-2015-196>.
- Li, T., Wang, G., Zhou, H., Ning, X., & Zhang, C. (2022). Numerical Simulation Study on the Effects of Co-Injection of Pulverized Coal and Hydrochar into the Blast Furnace. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14084407>.
- Liu, X., Chen, L., Qin, X., & Sun, F. (2015). Exergy loss minimization for a blast furnace with comparative analyses for energy flows and exergy flows. *Energy*, 93, 10-19. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2015.09.008>.
- Lyalyuk, V., Tarakanov, A., Kassim, D., Listopadov, V., & Miroshnichenko, O. (2016). Technological Aspects of the Use of Lump Anthracite in Blast-Furnace Smelting. *Metallurgist*, 60, 142-149. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0264-0>.

- Lyalyuk, V., Tarakanov, A., Kassim, D., Otorvin, P., & Pinchuk, D. (2017). Blast-furnace operation with pulverized-coal injection and with chunk anthracite. *Steel in Translation*, 47, 469-472. <https://doi.org/10.3103/S0967091217070063>.
- Lyalyuk, V.P., Tarakanov, A.K., Chuprinov, E.V. et al. (2021). Possibility of Increasing the Efficiency of Blast Furnace Smelting Depending on the Operating Conditions of Blast Furnaces. *Steel Transl.* 51, 795–804. <https://doi.org/10.3103/S0967091221110085>
- Raygan, S., Abdizadeh, H. & Eskandari Rizi, A. (2010). Evaluation of four coals for blast furnace pulverized coal injection. *J. Iron Steel Res. Int.* 17, 8–12. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60065-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60065-9)
- Shen, Y., & Yu, A. (2016). Modelling of injecting a ternary coal blend into a model ironmaking blast furnace. *Minerals Engineering*, 90, 89-95. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2015.12.009>.
- Shengli, W., Hongliang, H., Haifa, X., Hongwei, W., & Weizhong, T. (2009). Increasing proportion of natural lump ores in blast furnace. *Revue De Metallurgie-cahiers D'Informations Techniques*, 106, 160-167. <https://doi.org/10.1051/METAL/2009028>.
- van Straaten, V., de Graaff, B. & Engel, E. (2019). Hot Blast System Development: Technology, Operations, Campaign Management. *Berg Huettenmaenn Monatsh* 164, 452–460. <https://doi.org/10.1007/s00501-019-00916-8>.
- Yang, Lc., Pang, Qh., He, Zj. et al. (2021). Kinetic study on co-combustion of pulverized anthracite and bituminite for blast furnace injection. *J. Iron Steel Res. Int.* 28, 949–964. <https://doi.org/10.1007/s42243-021-00564-8>.
- Ren, S., Zhang, J., Liu, W., Su, B., Xing, X., & Bai, Y. (2013). An Integrated Evaluation System of Anthracite, Meager-lean Coal and Bituminous Coal Co-injection for a Blast Furnace. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35, 2123 - 2131. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.645995>.