

О.І. ЗЕЛЕНСЬКИЙ

ОЦІНКА ВПЛИВУ КОКСУ, ОТРИМАНОГО ЗА УЧАСТЮ ОБ'ЄМНО-МОДИФІКУЮЧИХ ПРИСАДОК, НА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

У статті розглянуто вплив показника післяреакційної міцності коксу CSR (Coke Strength after Reaction) на техніко-економічні показники доменного процесу. Показано, що при виробництві металургійного коксу з використанням об'ємно-модифікуючих присадок у кількості 0,25% від маси вугільної заправки покращується його міцність, зокрема показник CSR. Як об'ємно-модифікуючі присадки застосовували електрокорунд α - Al_2O_3 та карборунд α -SiC з крупністю часток <45 мкм і вибромелений карборунд α -SiC крупністю <12 мкм.

За рахунок введення тонкоподрібнених порошоків електрокорунду та карборунду у вугільну шихту було отримано максимальне збільшення показника післяреакційної міцності коксу (CSR) на 7,6%.

Вплив змін окремих показників якості коксу на його витрату та продуктивність доменної печі оцінювали відповідно до керівного документа металургійного дивізіону ТОВ «Метінвест Холдинг». Цей документ містить докладну методику, призначену для використання при аналізі коливань питомої витрати коксу та продуктивності доменних печей під впливом змін технологічних параметрів доменної плавки (пофакторний аналіз). В основі даної методики лежать кількісні залежності між параметрами (факторами), що змінюються, і питомою витратою коксу (продуктивністю доменних печей).

Зроблена експертна техніко-економічна оцінка доцільності внесення до шихти 0,25% тонкоподрібнених порошоків α - Al_2O_3 та α -SiC з точки зору доменного виробництва з технологією вдування пиловугільного палива. Результати свідчать, що, незважаючи на збільшення вартості коксу при введенні в шихту об'ємно-модифікуючих присадок, може бути досягнуто зниження собівартості чавуну за рахунок очікуваного зниження питомої витрати коксу спричиненого підвищенням його післяреакційної міцності.

Ключові слова: кокс, електрокорунд, карборунд, доменна піч, техніко-економічні показники.

О.И. ЗЕЛЕНСКИЙ

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОКСА, ПОЛУЧЕННОГО С ОБЪЕМНО-МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ПРИСАДКАМИ, НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

В статье рассмотрено влияние показателя послереакционной прочности кокса CSR (Coke Strength after Reaction) на технико-экономические показатели доменного процесса. Показано, что при производстве металлургического кокса с использованием объемно-модифицирующих присадок в количестве 0,25% от массы угольной загрузки улучшается его прочность, в частности показатель CSR. В качестве объемно-модифицирующих присадок применяли электрокорунд α - Al_2O_3 и карборунд α -SiC с крупностью частиц <45 мкм, а также вибромолотый карборунд α -SiC крупностью <12 мкм.

За счет введения тонкоизмельченных порошков электрокорунда и карборунда в угольную шихту было получено максимальное увеличение показателя послереакционной прочности кокса (CSR) на 7,6 %.

Влияние изменений отдельных показателей качества кокса на его расход и производительность доменной печи оценивали в соответствии с руководящим документом металлургического дивизиона ООО «Метинвест Холдинг». Этот документ содержит подробную методику, предназначенную для использования при анализе колебаний удельного расхода кокса и производительности доменных печей под влиянием изменений технологических параметров доменной плавки (пофакторный анализ). В основе данной методики лежат количественные зависимости между изменяющимися параметрами (факторами) и удельным расходом кокса (производительностью доменных печей).

Выполнена экспертная технико-экономическая оценка целесообразности внесения в шихты 0,25% тонкоизмельченных порошков α - Al_2O_3 и α -SiC с точки зрения доменного производства с технологией вдувания пылеугольного топлива. Результаты свидетельствуют, что, несмотря на увеличение стоимости кокса при введении в шихту объемно-модифицирующих присадок, может быть достигнуто снижение себестоимости чугуна за счет ожидаемого уменьшения удельного расхода кокса, вызванного повышением его послереакционной прочности.

Ключевые слова: кокс, электрокорунд, карборунд, доменная печь, технико-экономические показатели.

О. I.ZELENSKII

THE ESTIMATION OF THE EFFECT OF COKE, OBTAINED WITH PARTICIPATION OF VOLUME-MODIFYING ADDITIVES, ON THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF BLAST FURNACE SMELTING

The article deals with the effect of the coke resistance index CSR (Coke Strength after Reaction) on the technical and economic indicators of the blast furnace process. It is shown that in the production of metallurgical coke using volume-modifying additives in the amount of 0.25% by weight of the coal load, its strength improves, in particular, index CSR. As a volume-modifying additives, α - Al_2O_3 electrocorundum and α -SiC carborundum with a particle size of <45 μm and vibromilenum α -SiC carborundum with a particle size <12 μm were used.

Due to the introduction of fine powders of electrocorundum and carborundum into the coal charge, the maximum increase in the coke post-reaction strength index (CSR) by 7.6% was obtained.

The influence of changes in individual indicators of coke quality on its consumption and productivity of the blast furnace was assessed in accordance with the guidance document of the metallurgical division of Metinvest Holding LLC. This document contains a detailed methodology for use in analyzing fluctuations in specific coke consumption and throughput of blast furnaces influenced by changes in blast furnace process parameters (by factor analysis). This technique is based on quantitative relationships between changing parameters (factors) and specific coke consumption (blast furnace productivity).

There has been made an expert technical and economic assessment of the feasibility of introducing 0.25% fine powdered α - Al_2O_3 and α -SiC powders into the mixture from the point of view of blast-furnace production with pulverized fuel injection technology. The results show that, despite the increase in the cost of coke with the introduction of volume-modifying additives into the mixture, a reduction in the cost of iron can be achieved due to the expected reduction in the specific consumption of coke due to an increase in its post-reaction strength.

Keywords: coke, electrocorundum, carborundum, blast furnace, technical and economic indicators.

Постановка проблеми. Технологічне паливо використовується практично у всіх стадіях металургійного виробництва – при підготовці руд та нерудних матеріалів, виплавці чавуну та сталі, отриманні прокату. При цьому в собівартості кінцевої металургійної продукції найбільшу частину становлять витрати по першому переділу – доменному виробництву. Це виробництво як паливо використовує в першу чергу кокс, який у доменній печі виконує три головні функції [1-3]:

- джерело тепла для здійснення хімічних реакцій та фазових перетворень доменної шихти;
- відновник у хімічних реакціях;
- розпушувач стовпа шихтових матеріалів.

Кокс є найдорожчим компонентом доменної шихти, тому в сучасному доменному виробництві у великих масштабах використовують інші види палива, що подаються в доменну піч разом із нагрітим дуттям, залізородною частиною шихти та коксом. Протягом ХХ ст. на провідних підприємствах галузі питома витрата коксу на виплавку чавуну знизилася з 800-1000 до 250-300 кг/т чавуну. Найбільш перспективним заміником коксу є пиловугільне паливо (ПВП) [1, 4-6].

Будь-які заміники коксу можуть частково приймати на себе функції відновника і джерела тепла. Кокс як розпушувач замінити нічим, тому що він – єдиний компонент доменної шихти, що залишається в твердій фазі на нижніх горизонтах печі в зоні найбільш високих температур і забезпечує необхідну газопроникність засипу та дренаж рідких продуктів плавки. При використанні заміників витрата коксу знижується, і кокс, що залишився, повинен бути ефективним розпушувачем в умовах збільшених рудних навантажень, тобто значна частина коксу повинна надходити, зберігши свої початкові склад і властивості, в нижню зону доменної печі, де вуглець коксу згоряє при взаємодії з киснем дуття [1].

У зв'язку з цим вимоги до якості коксу при його частковій заміні іншими видами палива

збільшуються, в першу чергу за показниками реакційної здатності (CRI) та міцності коксу після реакції з CO₂ (CSR), які найбільш повно характеризують поведінку коксу в доменній печі [7, 8]. Для доменних печей з технологією вдування ПВП оптимальні значення за цими показниками повинні становити: CRI ≤ 30 %; CSR ≥ 60 %. У свою чергу, значення показників CRI та CSR практично повністю залежать від складу вугільної шихти, використаної для виробництва коксу. Тому для досягнення заданих значень якісних показників коксу CRI/CSR необхідно використовувати дороге коксівне вугілля, яке для вітчизняного шахтного фонду є дефіцитом.

Аналіз останніх джерел. У роботах [9-11] показана можливість покращення якості коксу за рахунок використання в шихті для коксування об'ємно-модифікуючих присадок.

Метою роботи є: проведення досліджень щодо оцінки впливу використання об'ємно-модифікуючих присадок при виробництві доменного коксу на техніко-економічні показники виплавки чавуну.

Виклад основного матеріалу. Вплив змін окремих показників якості коксу на його витрату і продуктивність доменної печі оцінюються відповідно до керівного документа металургійного дивізіону ТОВ «Метінвест Холдинг» [12]. Цей документ містить докладну методику, призначену для використання при аналізі коливань питомої витрати коксу та продуктивності доменних печей під впливом змін технологічних параметрів доменної плавки (пофакторний аналіз) [13]. В основі даної методики лежать кількісні залежності між параметрами (факторами), що змінюються, і питомою витратою коксу (продуктивністю доменних печей).

Згідно з керівним документом [12] на продуктивність доменної печі та витрату коксу впливає кілька показників його якості (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив технологічних факторів на питому витрату коксу та продуктивність доменної печі

№ з/п	Фактори та одиниці виміру	+ збільшення – зменшення	
		витрата коксу, %	продуктивність, %
1	Зменшення вмісту золи в коксі на кожен 1 %	-1,3 / -1,74	+1,3
2	Зменшення вмісту сірки в коксі на кожен 0,1 % при рівні сірки у чавуні [S] = 0,05 % [S] = 0,04 % [S] = 0,03 % [S] = 0,02 % [S] = 0,01 %	-0,18 / -0,24	+0,18
		-0,22 / -0,29	+0,22
		-0,27 / -0,36	+0,27
		-0,38 / -0,52	+0,38
		-0,71 / -0,95	+0,71
3	Збільшення міцності коксу, на кожен 1 %: за показником M ₂₅ за показником CSR	-0,6 / -0,8	+0,6
		-0,54 / -0,7	+0,49
4	Зменшення стирання коксу за показником M ₁₀ на кожен 1 %	-2,8 / -3,75	+2,8
5	Зменшення вмісту в коксі (на кожен 1 %) фракції +80 мм -25 мм	-0,2 / -0,27	+0,2
		-1,0 / -1,34	+1,0

* – у чисельнику вказані нормативи для технології з використанням природного газу, у знаменнику – з вдуванням ПВП.

Розрахунок техніко-економічних показників впливу коксу, отриманого з використанням об'ємно-модифікуючих присадок, на його питому витрату та продуктивність доменної печі проводили на основі експериментальних даних, отриманих нами раніше [14]. Для розрахунку використовували показник післяреакційної міцності коксу, отриманого з трьома видами присадок:

- 1) електрокорунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), фракція <45 мкм;
- 2) карборунд ($\alpha\text{-SiC}$), фракція <45 мкм;
- 3) карборунд ($\alpha\text{-SiC}$) вібромелений (в/м), фракція < 12 мкм.

Вміст всіх присадок у шихті для коксування становив 0,25%. У роботі [14] було показано, що такий вміст присадок у шихті не впливає на рівень зольності одержуваних коксів. Тому в даному розрахунку не враховували вплив зольності коксу на його витрату та продуктивність доменної печі. Результати визначення показника CSR експериментальних коксів наведено в табл. 2. У нижньому рядку даної таблиці показано покращення показника CSR щодо еталонного коксу (отриманого з тієї ж шихти без присадок).

Таблиця 2 – Післяреакційна міцність (CSR) коксів, отриманих з використанням об'ємно-модифікуючих присадок

Показатель, %	Эталонный кокс	Тип присадки		
		$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-SiC}$	$\alpha\text{-SiC}$ в/м
CSR	35,8	41,3	41,5	43,4
Δ CSR	–	+5,5	+5,7	+7,6

У табл. 3 наведено попередню експертно-економічну оцінку подачі в шихту 0,25 % тонкоподрібнених порошків $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та $\alpha\text{-SiC}$ з точки зору доменного виробництва з використанням ПВП.

Таблиця 3 – Оцінка техніко-економічних показників доменної плавки

	Базовий варіант	Розрахунковий варіант		
		$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	$\alpha\text{-SiC}$	$\alpha\text{-SiC}$ в/м
Вартість 1т присадки, USD*	0	180	276	368
Вартість 0,25 % (2,5 кг) присадки, USD	0	0,45	0,69	0,92
Вартість 1т кокса, USD	292	292,45	292,69	292,92
Питома витрата коксу на 1т чавуну, кг	350	335,4	334,8	329,8
Різниця питомої витрати коксу:				
%	0	3,85	3,99	5,32
кг	0	-14,6	-15,2	-20,2
Вартість питомої витрати коксу на 1 т чавуну, USD	102,20	98,09	97,99	96,61
Ефект від зниження собівартості 1 т чавуну, USD	0	4,11	4,21	5,59
Збільшення продуктивності доменної печі, %	0	2,7	2,8	3,7

* – ціни вказані станом на листопад 2021 р. [15, 16]

Висновки. Таким чином, незважаючи на збільшення вартості коксу при введенні в шихту об'ємно-модифікуючих присадок, можна досягти зниження собівартості чавуну за рахунок очікуваного зменшення питомої витрати коксу, викликаного підвищенням його післяреакційної міцності.

Список літератури

1. Филатов Ю.В. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества: Монография / Ю.В. Филатов, Е.Т. Ковалев, И.В. Шульга, С.И. Кауфман, А.И. Коломийченко [Под. ред. С.Л. Ярошевского]. – Киев: Наукова думка, 2011. – 128 с.
2. Rogozhnikov I.S. Effect of Ore/Coke Ratio as a Function of Blast-Furnace Radius on Configuration of Softening and Melting (Cohesion) Zone / I. S. Rogozhnikov, S. P. Rogozhnikov // Metallurgist. – 2021. - Volume 65. - P. 605–616.
3. Qing Q. Lv. A study on the characteristics of coke in the hearth of a superlarge blast furnace / Qing Q. Lv, Yong S. Tian, Ping Du, Jun L. Zhou, Guang H. Wang // PLoS One. – 2021. – Volume 16. – Issue 3. – e0247051
4. Yu Wang. Combustion Characteristics of Coal for Pulverized Coal Injection (PCI) Blending with Steel Plant Flying Dust and Waste Oil Sludge / Yu Wang, Chong Zou, Junxue Zhao, Fei Wang // ACS Omega. – 2021. – Volume 6. – Issue 43. – P. 28548–28560.
5. Combustion Enhancement of Pulverized Coal with Targeted Oxygen-Enrichment in an Ironmaking Blast Furnace / Zhenfeng Zhou, Ruihao Wang, Qiuji

Yi,Guang Wang, Chunyuan Ma // Processes. - 2021. - Volume 439. - Issue 3. - 440.

6. Alekhnovich A.N. New Technologies of Pulverized Coal Combustion. Oxy-Fuel Combustion / A.N. Alekhnovich // Power Technology and Engineering. - 2022. - Volume 55. - P. 894-899.

7. Ковальчик Р.В.Изменение интенсивности доменной плавки при использовании кокса с различной горячей прочностью / Р.В. Ковальчик, А.А. Томаш, Ю.А. Зинченко // Металл и лите Украины. - 2008. - № 7-8. - С. 27-30.

8. Ковальчик Р.В. Снижение себестоимости чугуна за счет выбора методом Гаусса-Зейделя оптимального состава угольной шихты для производства кокса / Р.В.Ковальчик, А.А. Томаш, В.Б. Семакова // Вісник Приазовського державного технічного університету. - 2009. - Вип. № 19. - С. 9-12.

9. Fuping T., Xiaoyang L., Xu W., Xibo M. Coal blending coking technology. China Patent, 2010, No. 102559230A / [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ipfeibiao.com/patent/things/look/2010105847425>.

10. Зеленский О.И. Современные направления использования неспекающихся добавок в производстве кокса / О.И. Зеленский // Углекимический журнал. - 2013. - № 3. - С. 21-28.

11. Зеленский О.И. Получение кокса улучшенного качества из модифицированных насыпной и трамбованной шихт / О.И. Зеленский, М.А. Соловьев // Углекимический журнал. - 2017. - № 2. - С. 22-26.

12. Руководящий документ РД 3409 3721 2015 «Доменные печи. Нормативы расхода кокса и производительности», Metallurgicheskii divizion ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ», 2015 г. - 13 с.

13. Ковалев Е.Т. Влияние качества угольной шихты на реакционную способность, послереакционную прочность кокса и технико-экономические показатели доменного процесса / Е.Т. Ковалев, И.В. Шульга, А.И. Рыщенко, Дроздник И.Д., Д.В. Мирошниченко // Углекимический журнал. - 2008. - № 3-4. - С. 41-48.

14. Zelenskii O.I. Coking of batch with modifying additives at ChAO Zaporozhkok / O.I. Zelenskii, A.S. Gaidenko, G.M. Tkalic // Coke and Chemistry. - 2017. - Vol. 60, № 5. - p. 189-192.

15. Офіційний сайт корпорації Zibo Xiyan Nano Materials Co., Ltd. : [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://en.zbxynm.com/>

16. Офіційний сайт компанії ZhenAn: [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.metal-silicon.com/tag/black-silicon-carbide-powder>

Monografiya / Yu.V. Filatov, E.T. Kovalev, I.V. Shulga, S.I. Kaufman, A.I. Kolomiychenko [Pod. red. S.L. Yaroshevskogo]. - Kiev: Naukova dumka, 2011. - 128 s.

2. Rogozhnikov I.S. Effect of Ore/Coke Ratio as a Function of Blast-Furnace Radius on Configuration of Softening and Melting (Cohesion) Zone / I. S. Rogozhnikov, S. P. Rogozhnikov // Metallurgist. - 2021. - Volume 65. - P. 605-616.

3. Qing Q. Lv. A study on the characteristics of coke in the hearth of a superlarge blast furnace / Qing Q. Lv, Yong S. Tian, Ping Du, Jun L. Zhou, Guang H. Wang // PLoS One. - 2021. - Volume 16. - Issue 3. - e0247051

4. Yu Wang. Combustion Characteristics of Coal for Pulverized Coal Injection (PCI) Blending with Steel Plant Flying Dust and Waste Oil Sludge / Yu Wang, Chong Zou, Junxue Zhao, Fei Wang // ACS Omega. - 2021. - Volume 6. - Issue 43. - P. 28548-28560.

5. Combustion Enhancement of Pulverized Coal with Targeted Oxygen-Enrichment in an Ironmaking Blast Furnace / Zhenfeng Zhou, Ruihao Wang, Qiuji Yi, Guang Wang, Chunyuan Ma // Processes. - 2021. - Volume 439. - Issue 3. - 440.

6. Alekhnovich A.N. New Technologies of Pulverized Coal Combustion. Oxy-Fuel Combustion / A.N. Alekhnovich // Power Technology and Engineering. - 2022. - Volume 55. - P. 894-899.

7. Kovalchik R.V. Izmenenie intensivnosti domennoy plavki pri ispolzovanii koksa s razlichnoy goryachey prochnostyu / R.V. Kovalchik, A.A. Tomash, Yu.A. Zinchenko // Metall i lite Ukrainyi. - 2008. - № 7-8. - S. 27-30.

8. Kovalchik R.V. Snizhenie sebestoimosti chuguna za set vyibora metodom Gaussa-Zeydelya optimalnogo sostava ugolnoy shihtyi dlya proizvodstva koksa / R.V. Kovalchik, A.A. Tomash, V.B. Semakova // Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu. - 2009. - V. № 19. - S. 9-12.

9. Fuping T., Xiaoyang L., Xu W., Xibo M. Coal blending coking technology. China Patent, 2010, No. 102559230A / [Elektronniy resurs]. - Rezhim dostupu: <http://www.ipfeibiao.com/patent/things/look/2010105847425>.

10. Zelenskii O.I. Sovremennyye napravleniya ispolzovaniya nespekayuschihysya dobavok v proizvodstve koksa / O.I. Zelenskii // Uglehimicheskii zhurnal. - 2013. - № 3. - S. 21-28.

11. Zelenskii O.I. Poluchenie koksa uluchshennogo kachestva iz modifitsirovannyih nasyipnoy i trambovannoy shiht / O.I. Zelenskii, M.A. Solovev // Uglehimicheskii zhurnal. - 2017. - № 2. - S. 22-26.

12. Rukovodyaschiy dokument RD 3409 3721 2015 «Domennyye pechi. Normativyi rashoda koksa i proizvoditelnosti», Metallurgicheskii divizion ООО «МЕТИНВЕСТ ХОЛДИНГ», 2015. - 13 с.

13. Kovalev E.T. Vliyanie kachestva ugolnoy shihtyi na reaktsionnuyu sposobnost, poslereaktsionnuyu prochnost koksa i tehniko-ekonomicheskie pokazateli domennogo protsessa / E.T. Kovalev, I.V. Shulga, A.I.

References (transliterated)

1. Filatov Yu.V. Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya domennogo koksa uluchshennogo kachestva:

Ryischenko, I.D. Drozdnik, D.V. Miroshnichenko // Uglehimicheskii zhurnal. – 2008. – № 3-4. – S. 41-48.

14. Zelenskii O.I. Coking of batch with modifying additives at ChAO Zaporozhkoks / O.I. Zelenskii, A.S. Gaidaenko, G.M. Tkalic // Coke and Chemistry. – 2017. – Vol. 60, № 5. – p. 189-192.

15. Ofitsiynny sayt korporatsiyi Zibo Xiyan Nano Materials Co., Ltd. : [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://en.zbxynm.com/>

16. Ofitsiynny sayt kompaniyi ZhenAn: [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://www.metal-silicon.com/tag/black-silicon-carbide-powder>

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зеленський Олег Іванович (Зеленский Олег Иванович, Zelenskii Oleh Ivanovych) – Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», заступник завідувача коксовим відділом; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/orcid=0000-0001-8567-2129>; e-mail: zelenskii.ukhin@gmail.com