

Засельський В. Й., Пополов Д. В.

Визначення важливих чинників енергоємності у процесі доменного виробництва

Zaselskyi V.Y., Popolov D.V.

Identification of critical factors affecting energy consumption in the blast furnace production process

Метою досліджень є виявлення факторів, що впливають на енергоємність доменного виробництва, визначення та надання науково-обґрунтованих рекомендацій щодо застосування необхідного обладнання, яке дозволяє зменшити енергоспоживання в існуючих технологічних трактах. Виявлення факторів виконувалось методом експертного оцінювання. На першому етапі формувалась експертна група з фахівців вищезазначеного виробництва, на другому етапі визначалась їх компетентність; на третьому етапі використовувався метод Дельфи, експертами були сформовані фактори котрі впливають на енергоємність доменного виробництва; на четвертому етапі були надані оцінки ступеня впливу зміни обраних факторів. Отримані дані оброблялись статистичним методом та ранжувались у порядку зменшення впливу на енергоємність досліджуваного виробництва. Ступінь узгодженості думок експертів оцінювалось за допомогою коефіцієнта конкордації. За результатами отриманої експертної оцінки було встановлено, що найбільший вплив на енергоємність доменного виробництва чинить вміст некондиційних фракцій коксу та залізовмісної частини шихти. Тому була звернута увага на підготовчі процеси пов'язані з розділом металургійної шихти за крупністю та виконано аналіз формування гранулометричного складу шихтових матеріалів на різних ділянках тракту його переробки і транспортування до подачі в доменну піч. Аналіз отриманих даних показав, що на тракті шихтопідготовки відбувається постійне нарощування вмісту некондиційного матеріалу в об'ємі шихти, в той же час ефективність грохочення сировини не перевищує 50 % для агломерату та 60 % для коксу, що не дозволяє забезпечити необхідні технологічні вимоги до прийнятних відсотків дрібних фракцій. З'ясовано, що в початковій шихті міститься 8,6 % і 19,9 % забиваючих частинок, розміри котрих близькі до розміру апертури сит (5 мм для агломерату та 25 мм для коксу) у зв'язку з чим, вірогідність їх проходження через отвори сіячої поверхні наближаються до нуля. При грохоченні досліджуваних матеріалів товстим шаром важкопрохідні через отвори сіячої поверхні частинки з часом забивають її, внаслідок чого знижується ефективність відсіву некондиційної частини металургійної шихти, що суттєво впливає на енергоємність доменного виробництва. Рекомендуються знайти сучасні технічні рішення, які б дозволили збільшити ефективність грохочення за рахунок зменшення забиття сіячої поверхні грохотів, а також одночасно з цим вирішити питання якості стабілізації гранулометричного складу шихти яка подається в доменну піч.

Ключові слова: доменне виробництво, розсів, стабілізація, гранулометричний склад, шихта, енергоємність.

The purpose of the research is to identify factors that affect the energy intensity of blast furnace production, determination and provision of scientifically based recommendations on the use of the necessary equipment, which allows to reduce energy consumption in the existing technological paths. The identification of factors was identified by expert evaluation. At the first stage an expert group of specialists from the above-mentioned production was formed, at the second stage was to determine their competence; the third stage the Delphi method was used, and the experts identified the factors that affect the energy intensity of blast furnace production; at the fourth stage, the assessed the degree of influence of changes in the selected factors. The data obtained were processed statistically and ranked in descending order of influence on the energy intensity of the studied production. The degree of consistency of experts' opinions was assessed using the concordance coefficient. According to the results of the expert assessment, it was found that the greatest impact on the energy intensity of blast furnace production is made by the content of substandard fractions of coke and the iron-containing part of the charge. Therefore, attention was paid to preparatory processes related to the separation of the metallurgical charge by size and the analysis of the formation of the particle size distribution of charge materials at different parts of the route of its processing and transportation to the blast furnace. The analysis of the data showed that in the charge preparation path there is a constant increase in the content of substandard material in the volume of the charge, while the screening efficiency of raw materials does not exceed 50 % for sinter and 60 % for coke, which does not allow to meet the necessary technological requirements for acceptable percentages of fines. It was found out that the initial part of the charge contains up to 8.6 % and 19.9 % of clogging particles, the size of which is close to the size of the sieve aperture (5 mm for agglomerate and 25 mm for coke), and therefore, the probability of their passage through the holes of the screening surface are close to zero. When screening the materials under study materials in a thick layer, hard-to-pass particles through the holes of the sieving clog the screening surface over time, resulting in a decrease in screening efficiency of the substandard part of the metallurgical charge, which significantly affects energy intensity of blast furnace production. It is recommended to find modern technical solutions that would allow to increase the efficiency of screening, taking into account the reduction of clogging of the screening surface, and at the same time to solve the issue of quality stabilization of the particle size distribution of the charge fed into the blast furnace.

Keywords: blast furnace production, screening, stabilization, granulometric composition, charge, energy intensity.

Вступ

Металургійне виробництво завжди було рушійною силою економіки України та привабливою галуззю для інвестицій, оскільки за короткий період часу, при забезпеченні належних умов, дозволяє

підвищити обсяги і якість виробленої продукції, що дає суттєву прибутковість. Однак, зараз металургія України знаходиться в дуже складному становищі адже обсяги виробництва в період воєнного стану

© Засельський В. Й. - д.т.н., проф. ННТІ ДУЕТ м.Кривий Ріг
Пополов Д. В. - к.т.н., доц. ННТІ ДУЕТ м.Кривий Ріг

Zaselskyi V. Y. - d.t.s. prof SUET Kryvyi Rih
Popolov D. V. - c.t.s. docent SUET Kryvyi Rih



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>

впали більше ніж у п'ять разів порівняно з довоєнним рівнем.

Разом з перемогою України настане час відродження для металургійної галузі, яка потребуватиме удосконалення її енергоємних переділів, що надасть можливість знизити собівартість готової продукції та бути конкурентно привабливою галуззю на світовому ринку.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Використовуючи дані World Steel Association [1] був проведений аналіз виробництва чорних металів в Україні за останні десять років, який не включав роки військової агресії російської федерації

(див. рис. 1), за результатами котрого видно, що на протязі 2011/15 років спостерігається стрімке зниження виробництва сталі й чавуну на 35 % та 24,5 % відповідно. Незначне збільшення виробництва було в 2016 році, але з компенсуючим і надалі прогресуючим падінням виробництва у наступному році. З 2017 року помітна стабілізація обсягів виробництва чавуну та сталі, які практично дорівнюють один одному, залишаючись основними переділами металургійної галузі України.

Розглянемо динаміку ціноутворення за останній час на прикладі сталеві арматури, яка є основною статтею українського експорту.

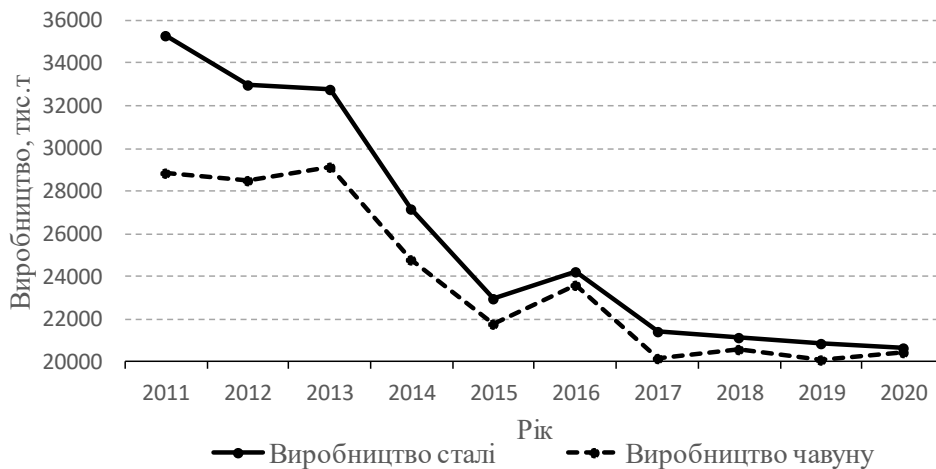


Рисунок 1 – Виробництво чорних металів в Україні

Зростання ціни за тону сталеві арматури на світовому ринку, згідно [2, 3], в третьому кварталі 2021 року склало 26 %, що свідчить про стрімке зростання попиту на сталь в ЄС, в середньому на 8,8 %, викликане частковою зупинкою потужностей, що склало 5 % від загальної потужності ЄС, в наслідок COVID-19, зростання попиту у Об'єднаних Арабських Еміратах – на 35 %, Саудівської Аравії – на 18 % та Єгипті – на 24 %. Висока ціна стимулює виробників ЄС масово запускати потужності, що простоюють, так у 2021 році планувалось запуснути п'ять доменних печей загальною продуктивністю 11 млн. т, двох електросталеплавильних печей продуктивністю 2,5 млн. т.

Разом з зростанням попиту спостерігається повільне відновлення економік у ряді регіонів, для яких Україна є експортером прокатної продукції, так за даними World Bank [4] зростання ВВП у державах Єврозони складе 3,6 %, США – 3,5 %, Китай – 7,9 %, MENA – 2,1 %.

Отже, сплеск попиту на сталь є тимчасовим і зкорегується у відповідності з більш слабкою динамікою зростання ВВП, таким чином, зростання прибутку за рахунок збільшення обсягів виробництва сумнівне.

Зважаючи на вище викладене можна зробити висновок, що на даний час світова металургія знаходиться в так званій «Новій нормальності», котра не передбачає ні яких крупних подій, які б були здатні спровокувати сталі зростання споживання металургійної продукції, та й галузі в цілому. В даних умовах її розвиток можливий за рахунок впровадження новітніх технологій для оптимізації та зменшення операційних витрат. [5]

Враховуючи динаміку цін на електроенергію та природний газ для промислового виробництва України за даними [6, 7], які є ключовими складовими калькуляції собівартості металургійної продукції, встановлено, що за останні шість років темп їх росту склав в середньому 4,2 та 0,8 % відповідно, таким чином, зниження споживання цих ресурсів дозволяє суттєво зменшити операційні витрати.

Аналіз калькуляції собівартості готової продукції за металургійними переділами дозволив встановити, що найбільш енергоємними є коксо-доменне, тому виникає необхідність у виконанні аналізу факторів, що впливають на енергоємність саме цих ділянок з подальшим визначенням науково-обґрунтованих рекомендацій щодо вдосконалення їх технологічних трактів, застосування необхідного обладнання.

Стосовно коксового виробництва в роботах [8, 9] були проведені дослідження щодо зменшення енергетичних витрат і запровадження необхідних кроків, які дають можливість вдосконалити існуючі технологічні тракти підготовки вугільної шихти до коксування. Для доменного виробництва на теперішній час такі дослідження відсутні, що унеможливає надання рекомендацій, які б дозволили підвищити якість підготовки шихтових матеріалів до плавки та зменшити енергоємність цього металургійного процесу.

Мета і завдання досліджень

Метою досліджень було визначення факторів, які мають суттєвий вплив на енергоємність доменного виробництва та надання науково-обґрунтованих рекомендацій щодо застосування необхідного обладнання, яке дозволить зменшити дію цих факторів в існуючих технологічних трактах.

Матеріали та методи досліджень

Виявлення факторів, що впливають на енергоємність доменного виробництва реалізовувалось використовуючи метод експертного оцінювання.

На першому етапі виконувалось формування експертної групи у кількості десяти осіб, в роботі котрої прийняли участь фахівці ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», Криворізького національного університету, Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій, ПрАТ «Дніпровський металургійний завод», Навчально-наукового інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, Приазовського державного технічного університету, Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча, Азовсталь.

На другому етапі за методикою [10] виконувалось визначення компетентності експертів. Оцінка виконувалась за наступними характеристиками:

- рівень кваліфікації експерта в доменному виробництві;
- рівень теоретичної підготовки;

- практичний досвід роботи;
- широта кругозору.

Перераховані характеристики оцінювались за десятибальною шкалою керівниками вищої ланки. Після чого визначався показник, що характеризує об'єктивну оцінку компетентності експерта за формулою

$$h_{sj}^0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_{ji} \quad (1)$$

де n – кількість характеристик, $n = 4$;

K_{ij} – оцінка j -го експерта за i -характеристикою.

Також за десятибальною шкалою визначався показник відносної самооцінки експерта — суб'єктивний показник компетентності j -го експерта h_{sj}^c , за відповідними професійними якостями, а саме:

10 – експерт спеціалізується в даній галузі;

8 – експерт приймає участь в практичному вирішенні даного питання, але він не входить у сферу його спеціалізації;

5 – питання тісно пов'язане з спеціалізацією експерта (суміжна область практичної діяльності);

3 – питання тісно не пов'язане з спеціалізацією експерта (ознайомлення з проблемою за літературними джерелами, за досвідом роботи інших підприємств).

Компетентність j -го експерта в даному питанні характеризувалась як

$$h_{sj} = \frac{h_{sj}^0 \cdot h_{sj}^c}{100} \quad (2)$$

Результати оцінки експертів та розрахунок їх компетентності наведені в табл. 1.

Оскільки значення вагового коефіцієнта, що оцінює компетентність j -го експерта, можна інтерпретувати як вірогідність видачі експертом достовірної оцінки, то зважаючи на результати наведені у табл. 1 можна стверджувати, що вірогідність помилкової оцінки групою експертів не буде перевищувати 30 %, що є допустимою похибкою.

Таблиця 1 – Визначення компетентності експертів

№ експерта	Характеристика				h_{sj}^0	h_{sj}^c	h_{sj}
	1	2	3	4			
1	9	10	9	8	9	10	0,9
2	9	10	9	8	9	10	0,9
3	8	9	7	8	8	9	0,72
4	7	9	10	9	8,75	8	0,7
5	8	8	10	6	8	8	0,64
6	7	8	10	9	8,5	5	0,43
7	9	8	8	7	8	8	0,64
8	9	10	9	9	9,25	10	0,93
9	6	9	8	10	8,25	5	0,41
10	7	8	8	8	7,75	9	0,7
Середнє							0,7

На третьому етапі використовуючи метод Дельфі [11] виконувалось формування експертами переліку факторів, що впливають на енергоємність доменного виробництва. Кожному експертові розсилалась тема опитування — «Визначення факторів і оцінка їх впливу на енергоємність доменного виробництва», та пропонувалось сформуванню власний перелік. Початковий перелік був сформований на підставі обрання факторів, що найчастіше зустрічались, також були додатково включені фактори отримані на підставі обробки апріорних даних, отриманих на базі оброблення літературних джерел [12-23]. Далі перелік повторно розсилався експертам, які повинні були оцінити представлений список, і висловити свою думку з приводу його повноти і оптимальності. При цьому обчислювався коефіцієнт конкордації, і якщо в результаті виходила неузгодженість думок експертів — перелік переглядався повторно до тих пір, поки вона не з'являлась.

Після декількох турів підсумковий перелік складався саме з:

- вмісту заліза (у всій шихті без коксу, флюсу), X_1 ;
- вмісту фракції <5 мм у залізвмісній частині шихти, X_2 ;
- вмісту золи в коксі, X_3 ;
- міцності коксу за показником M_{25} , X_4 ;
- гарячої міцності коксу CSR, X_5 ;
- стиранності коксу за показником M_{10} , X_6 ;
- вмісту фракції +80 мм в коксі, X_7 ;

$$W = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M a_{ij} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M a_{ij} \right)^2}{M^2 \cdot (N^3 - N) - M \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{K_i} \gamma_{ki}} \quad (4)$$

де j – індекс номеру за порядком фактору, $j = 1 \dots N$;

N – кількість факторів;

i – індекс номеру за порядком експерта, $i = 1 \dots M$;

M – кількість експертів;

a_{ij} – ранг j -го фактору, визначений i -м експертом.

Після обробки зведених результатів, отриманих з формули (4), було встановлено, що величина коефіцієнта конкордації суттєво відрізняється від нуля, тому можна вважати, що між думкою експертів є суттєвий зв'язок. В цьому випадку оцінка значності коефіцієнта конкордації виконувалась за критерієм χ^2

$$\chi^2 = \frac{12 \cdot \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^M a_{ij} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M a_{ij} \right)^2 \cdot (N - 1)}{M \cdot N \cdot (N + 1) \cdot (N - 1) - \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^{K_i} \gamma_{ki}}, \quad (5)$$

котрий порівнювався з табличним значенням χ_{α}^2 , обраним при числі ступеня свободи $f = N - 1$ та рівні значності $\alpha = 5\%$, а саме

$$\chi_{(\alpha=5, f=9)}^2 = 16,92 < \chi^2 = 51,5. \quad (6)$$

Оскільки умова виконувалась, то з 95 % довірою вірогідністю можна було стверджувати, що ступінь узгодженості думок експертів щодо оцінки впливу обраних факторів на енергоємність доменного виробництва не викликала сумніву.

Результати досліджень та їх обговорення

За результатами обробки експертних даних методом апріорного ранжування факторів було вста-

- температури дуття, X_8 ;
- вмісту фракції <5 мм у коксі X_9 .

На четвертому етапі експерти виконували оцінку ступеня впливу зміни факторів на енергоємність доменного виробництва за десятибальною шкалою. Дані опитування збирались в експертній карті та оброблювались статистичними методами [24, 25], після чого експерти ознайомлювались з отриманими результатами з проханням скорегувати карту на свій розсуд, але враховуючи думку залученого експертного середовища. Після корегування, отримані дані знову оброблювались статистичними методами та ранжувались у порядку зменшення впливу на енергоємність доменного виробництва.

Оскільки, в оцінці i -го експерта є фактори які мають однаковий ранг, визначався показник групи зв'язаних рангів

$$\gamma_{ki} = t_{ki}^3 - t_{ki} \quad (3)$$

де t_{ki} – кількість однакових рангів в k -й групі зв'язаних рангів для i -го експерта; k – індекс групи зв'язаних рангів по ранжуванню, $k = 1 \dots K_i$;

K_i – кількість груп зв'язаних рангів в i -му ранжуванні (для i -го експерта).

Ступінь узгодженості думок експертів з урахуванням зв'язаних рангів оцінювалась за допомогою коефіцієнта конкордації

новлено, що, найбільш істотний вплив на енергоємність доменного виробництва чинить вміст некондиційної фракції (<25 мм) у коксі та (<5 мм) залізвмісній частині шихти.

Аналіз хімічного складу агломерату та коксу за межними фракціями (рис. 2, 3) дозволив встановити, що зі зменшенням розміру фракції вміст шкідливих елементів, таких як сірка для агломерату та зольність і волога для коксу зростають.

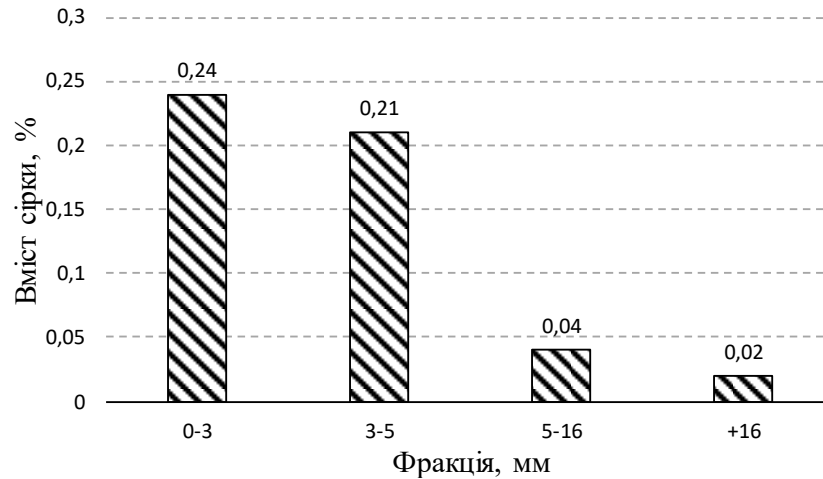


Рисунок 2 – Вміст сірки в агломераті за фракціями

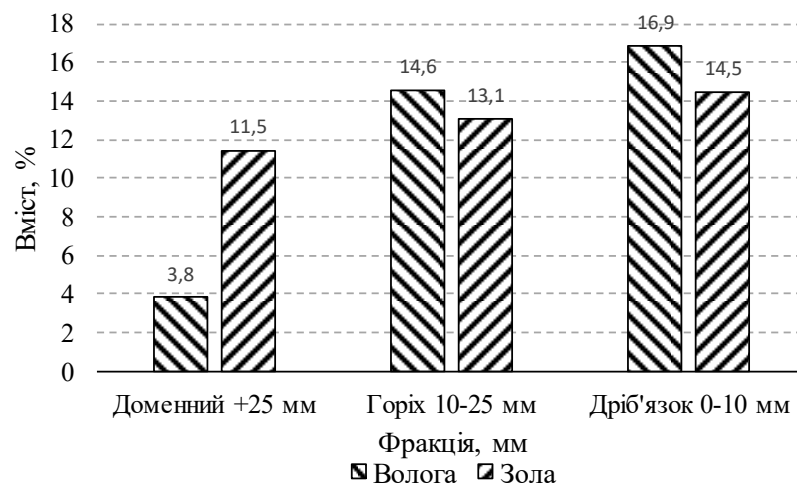


Рисунок 3 – Вміст вологи та золи в коксі за фракціями

Так з наведених гістограм видно, що шкідливі елементи зосереджуються в фракціях 0-5 мм для агломерату і 0-25 мм для коксу. Слід зазначити, що агломерат і кокс є штучним матеріалом, який отримується методом спікання з утворенням достатньо великої кількості дрібних фракцій, що пов'язано з:

- неправильною рубчастою формою, рихлою та абразивною поверхнею часток, які складаються з великої кількості порових каналів, окрім цього, агломерату властива фізична та хімічна неоднорідність;

- особливістю технології отримання, а саме процесом охолодження спеків методом мокрого або сухого гасіння — для коксу, або просмокування через шар заздалегідь зруйнованого пирога холодного повітря — для агломерату, при цьому градієнт температур на межі «спек-охолоджуюче середовище» досягає 875 °С, а швидкість охолодження коливається від 8...12 °С/хв у агломерату, до 50...60 °С/хв у коксу. [26]

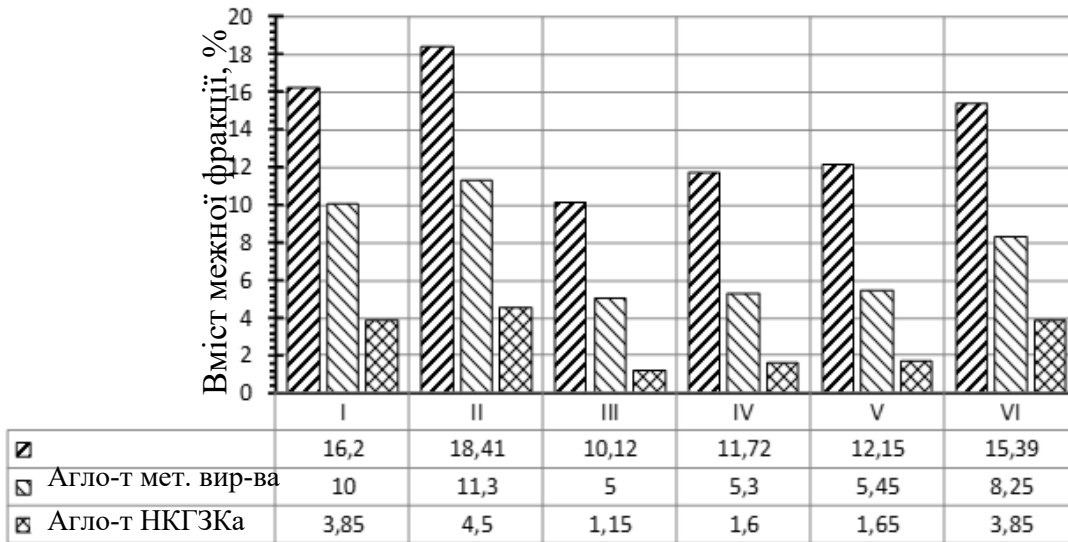
Такий технологічний процес отримання даної сировини створює передумови для виникнення в

шматках залишкової термічної напруги, сконцентрованої, переважно, в місцях утворення дефектів (тріщин, неоднорідностей) і в зонах максимальних значень градієнтів температур при охолодженні, тобто на поверхні окремих шматків.

Тому була звернута увага на підготовчі процеси пов'язані з розділом шихти за крупністю та виконано аналіз формування гранулометричного складу шихтового матеріалу на тракті його подачі в доменну піч.

Оцінка впливу напруженого стану часток на гранулометричний склад агломерату і коксу при його переміщенні по тракту шихтоподачі доменної печі виконувалася шляхом відбору проб в контрольних точках тракту шихтоподачі ДП-8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з центральними бункерами, головним чином в точках подання і розвантаження коксу і агломерату з подальшим розсіванням по межному класу, який для агломерату і коксу складає -5 мм та -25 мм, відповідно.

На підставі отриманих результатів були побудовані діаграми, що характеризують вміст в масиві агломерату і коксу некондиційних фракцій (рис. 4).



Кокс

Точка відбору проб

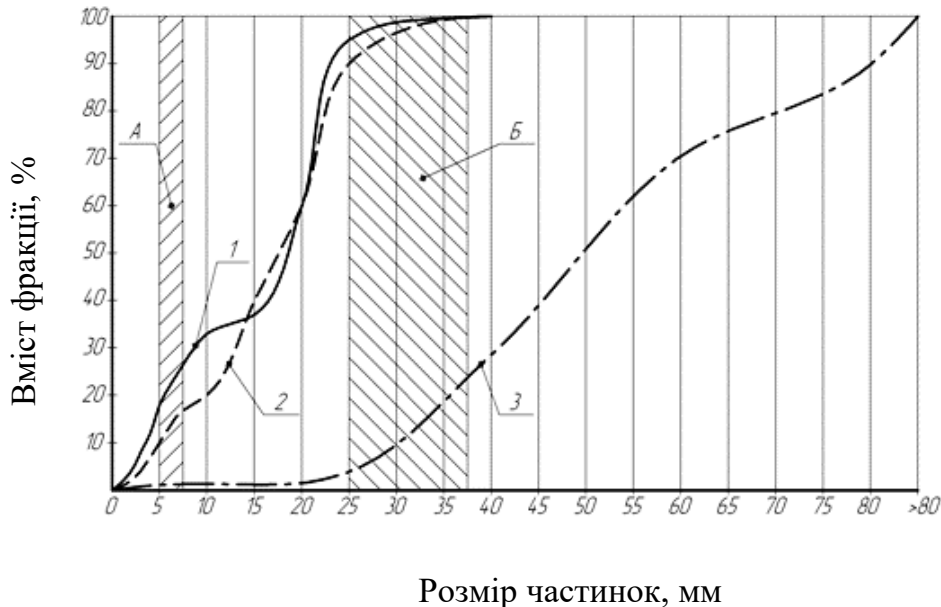
I - приймальний бункер; II - живильник грохоту; III - зона розвантаження сіючої поверхні; IV - випуск надрешітного продукту з проміжного бункера; V - тракт завантаження скіпа; VI - скіп

Рисунок 4 – Вміст межної фракції в масиві агломерату і коксу в точках відбору проб

З аналізу отриманих даних витікає, що в процесі транспортування агломерату та коксу по тракту шихтоподачі відбувається постійне нарощування в об'ємі шихти вмісту некондиційних фракцій, за рахунок дроблення частини шматків на перевантаженнях після грохоту, внаслідок чого вміст некондиційних фракцій в скіповій шихті залишається високим. Ефективність грохочення не перевищує 50 % для агломерату і 60 % для коксу, що не дозволяє

забезпечити технологічні вимоги, що пред'являються до якості підготовки металургійної шихти перед плавкою.

Для визначення причин низької ефективності грохочення виконувалося розсівання початкового матеріалу (точка відбору проб II - живильник грохоту) з подальшим аналізом отриманих даних шляхом побудови інтегральних характеристик розподілу розмірів часток початкового матеріалу (рис. 5).



1 - агломерат фабрики металургійного виробництва; 2 - агломерат НКГЗКа; 3-кокс; А – «трудні» зерна агломерату; Б - «трудні» зерна коксу

Рисунок 5 – Інтегральний розподіл розмірів часток початкового матеріалу

З аналізу отриманих інтегральних розподілів розмірів часток було встановлено, що в початковій заливовмісній частині шихти (агломераті) і паливної

(коксі) міститься відповідно до 6,84...8,6 % і 19,9 % забиваючих частинок, розміри яких близькі до розміру апертури сит (5 мм для агломерату і 25 мм

для коксу), у зв'язку з чим, вірогідність їх проходження через отвори сіючої поверхні наближається до нуля, що призводить до її забивання і як наслідок, низькій ефективності грохочення.

Таким чином, в процесі транспортування залізо-вмісної та паливної частин металургійної шихти по тракту шихтоподачі відбувається постійне нарощування некондиційних фракцій, виділення яких на існуючих грохотах повністю не вирішує задачу зниження вмісту дріб'язку в скіповій шихті, оскільки агломерат і кокс є важкогрохотимим матеріалом з великим числом часток, що забивають. В цьому випадку необхідно знайти технічні рішення, які б дозволили збільшити ефективність грохочення з урахуванням зменшення забивання сіючої поверхні грохотів, а також одночасно з цим вирішити питання стабілізації гранулометричного складу шихти, яка подається на колошник доменної печі.

Висновки

Дослідженнями встановлено, що найбільший вплив в теперішній час на енергоємність доменного виробництва чинить дуже великий вміст некондиційних фракцій у коксі та агломераті, які утворюються внаслідок їх транспортування та перевантаження на тракті шихтопідготовки металургійної сировини. Діючи грохоти для відсіву некондиційних фракцій мають низьку ефективність грохочення, це пов'язано головним чином з забиванням сіючої поверхні, що не дає змогу знизити вміст дріб'язку в скіповій шихті.

Таким чином, для зменшення енергоємності доменного виробництва треба знайти та обрати такі технічні рішення, які б дозволили суттєво на тракті підготовки металургійної шихти до плавки зменшити частку некондиційних фракцій агломерату та коксу, які поступають в доменну піч.

Перелік посилань

1. Steel Statistical Yearbook 2020 concise version. Brussels: World Steel Association, 2021. 46 p.
2. LME Steel Rebar // The London Metal Exchange: [Website]. URL: <https://www.lme.com> (viewed on: 13.08.2021).
3. Прогноз производства стали в Украине в 2021 г: отчет / за ред. Тарасенко А. Киев: GMK Center, 2020. 14 с.
4. World Bank Open Data // The World Bank: [Website]. Washington. URL: <https://data.worldbank.org> (viewed on: 14.08.2021).
5. Strategies for managing successfully during "New Normal" // Danieli News. 2018. № 177. P. 3-5.
6. Electricity prices for non-household consumers // Eurostat: [Веб-сайт]. URL: <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do> (дата звернення: 22.08.2021).
7. Інформація // Група Нафтогаз: [Веб-сайт]. URL: <https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/4D50A380B0969658C2257F7F0056E388?OpenDocument> (дата звернення: 20.08.2021).
8. Организация рационального дробления угольной шихты – путь к повышению качества кокса для доменной плавки / Лялюк В. П. и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 2. С. 48-52.
9. Zaslavskiy V., Popolov D., Zaytsev H. Upgrade of conveyor line for coal charge preparation with the use of modern grading-and-mixing equipment // Science and Innovation. 2021., No. 3 Vol. 17. P. 67-77.
10. Справочник по экономике: [Веб-сайт]. URL: <https://economy.info/page/113084250240042146039040040188183081175145167050/> (дата звернення: 31.08.2020).
11. Linstone H., Turoff M., Helmer O. The Delphi method Techniques and applications. Portland USA: Portland State University, 2002. 618 p.
12. Анализ путей повышения энергоэффективности выплавки чугуна в доменных печах НЛМК / Филатов С. В. и др. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017., вып. 8 Т. 60. С. 637-642.
13. Товаровский И. Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2014. № 28. С. 117-131.
14. Теория и практика подготовки металлургического кокса к доменной плавке: монография / Гусак В. Г. та ін., Киев: Наукова думка, 2011. 216 с.
15. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. Москва: Металлургия, 1980. 304 с.
16. Опытная плавка с уменьшенным выходом шлака / Бабарыкин Н. Н. та ін. // *Сталь*. 1964. № 12. С. 1069-1079.
17. Освоение технологии производства и плавка агломерата из концентрата глубокого обогащения / Некрасов З. И. та ін. // *Сталь*. 1970. № 3. С. 202-207.
18. Применение металлизированного сырья в доменных печах / Жак Р. М. та ін. // Обзорная информация Черная металлургия. Сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна. 1983. Вып. 4. С. 31.
19. Мойкин В. И., Боковиков Б. А., Бабушкин Н. М. Теплотехнический анализ работы доменной печи на металлизированной шихте методом математического моделирования // *Сталь*. 1978. № 11. С. 982-986.
20. Работа доменной печи с использованием освобожденного от мелочи высокоосновного агломерата / Прокофьев И. А. та ін. // *Сталь*. 1979. № 5. С. 332-333.
21. Журавлев Г. В., Попов Н. Н., Коростик П. О. Влияние качества кокса при выплавке чугуна // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1980. № 4. С. 28-29.
22. Товаровский И. Г., Бояровская Г. П. Эффективность нагрева доменного дутья // *Сталь*. 1977. № 12. С. 1068-1074.
23. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездоменной металлургии железа: учебник / Журавлев Ф. М. та ін., Кривой Рог: Чернявский Д. А., 2020. 663 с.
24. Куц В. В., Разумов М. С. Априорное ранжирование факторов при наличии связанных рангов: методические указания. курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2018. 14 с.
25. Кендел М. Ранговые корреляции. Москва: Статистика, 1975. 216 с.

26. Сортировка минерального сырья и шихт на вибрационных грохотах: монография / Учитель А. Д. и др. Днепрпетровск: Пороги, 1998. 194 с.

References

1. *Steel Statistical Yearbook 2020 concise version*. (2021). World Steel Association
2. *LME Steel Rebar*. The London Metal Exchange. <https://www.lme.com>
3. Tarasenko A. (Ed.). (2020). *Prognoz proizvodstva stali v Ukraine v 2021 g.* GMK Center
4. *World Bank Open Data*. The World Bank. Washington. <https://data.worldbank.org>
5. Strategies for managing successfully during "New Normal". (2018). *Danieli News*, (177), 3-5
6. *Electricity prices for non-household consumers*. (2021). Eurostat. <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
7. *Informatsiya*. (2021). Grupa Naftogaz: <https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/4D50A380B0969658C2257F7F0056E388?OpenDocument>
8. Lyalyuk, V. P. et al. (2010). Organizatsiya ratsionalnogo drobleniya ugolnoy shikhty – put k povysheniyu kachestva koksa dlya domennoy plavki. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, (2), 48-52
9. Zasel'skiy, V., Popolov, D., & Zaytsev, H. (2021). Upgrade of conveyor line for coal charge preparation with the use of modern grading-and-mixing equipment. *Science and Innovation*, 17(3), P. 67-77
10. *Spravochnik po ekonomike*. (2020). <https://economy.info/page/113084250240042146039040040188183081175145167050/>
11. Linstone, H., Turoff, M., & Helmer, O. (2002). *The Delphi method Techniques and applications*. Portland State University
12. Filatov, C. V. et al. (2017). Analiz putey povysheniya energoeffektivnosti vyplavki chuguna v domennykh pechakh NLMK. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 60(8), 637-642
13. Tovarovskiy, I. G. (2014). Normativnaya otsenka vliyaniya parametrov domennoy plavki na raskhod koksa i proizvoditelnost. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 28, 117-131
14. Gusak, V. G. (2011). *Teoriya i praktika podgotovki metallurgicheskogo koksa k domennoy plavke*. Naukova dumka
15. Ramm, A. N. (1980). *Sovremennyy domenny protsess*. Metallurgiya
16. Babarykin, N. N. et al. (1964). *Opytnaya plavka s umenshennym vykhodom shlaka*, 12, 1069-1079
17. Nekrasov, Z. I. (1970). Osvoenie tekhnologii proizvodstva i plavka aglomerata iz kontsentrata glubokogo obogashcheniya. *Stal*, (3), 202-207
18. Zhak, R. M. et al. (1983). Primenenie metallizovannogo syr'ya v domennykh pechakh. *Obzornaya informatsiya Chernaya metallurgiya. Ser. Podgotovka syrevykh materialov k metallurgicheskomu peredelu i proizvodstvo chuguna*, 4, 31
19. Moykin, V. I., Bokovikov, B. A., & Babushkin, N. M. (1978). Teplotekh-nicheskiy analiz raboty domennoy pechi na metallizovannoy shikhte metodom matematicheskogo modelirovaniya. *Stal*, (11), 982-986
20. Prokofev, I. A. et al. (1979). Rabota domennoy pechi s ispol'zovaniem osvobozhdenogo ot melochi vysokoosnovnogo aglomerata. *Stal*, (5), 332-333
21. Zhuravlev, G. V., Popov, N. N., & Korostik, P. O. (1980). Vliyanie kachestva koksa pri vyplavke chuguna. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, (4), 28-29
22. Tovarovskiy, I. G., & Boyarovskaya, G. P. (1977). Effektivnost nagreva domennogo dutya. *Stal*, (12), 1068-1074
23. Zhuravlev, F. M. et al. (2020). *Teoriya i tekhnologiya podgotovki shikhtovykh materialov dlya domennoy i bezdomennoy metallurgii zheleza*. Chernyavskiy D. A.
24. Kuts, V. V., & Razumov, M. S. (2018). *Apriornoe ranzhirovanie fakto-rov pri nalichii svyazannykh rangov*. Yugo-Zap. gos. un-t
25. Kendel, M. (1975). *Rangovye korrelyatsii*. Statistika
26. Uchitel A. D. et al. (1998). *Sortirovka mineralnogo syr'ya i shikht na vibratsionnykh grokhotakh*. Porogi

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 27.12.2023

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.02.2024