

УДК 622.788

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-24>

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ВИДІВ ТВЕРДОГО ПАЛИВА У ВИРОБНИЦТВІ ОКАТИШІВ

Ягольник Максим Вікторович,

кандидат технічних наук,

доцент кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

доцент кафедри металургії чавуну і сталі

Українського державного університету науки і технологій

ORCID ID: 0000-0003-2686-8601

Ковальов Дмитро Арсентійович,

професор, доктор технічних наук

ORCID ID: 0009-0000-4538-9118

Бочка Володимир Васильович,

професор кафедри металургії чавуну і сталі, доктор технічних наук

Українського державного університету науки і технологій

ORCID ID: 0000-0002-4935-0779

Актуальною проблемою в умовах сьогодення є вдосконалення технології та покращення якісних характеристик залізрудних окатишів. У статті розглянуто технологічні можливості використання різних видів твердого палива у виробництві окатишів. Відмічається, що питання окускування залізрудних матеріалів, що містять тверде паливо, яке має різні властивості та характеристики, у літературі розглянуті досить деталізовано, проте деякі аспекти із цього приводу потрібно вивчити докладніше. Характеристики твердого палива, наприклад вміст летких речовин, мають визначальний вплив на продуктивність процесу обпалу окатишів та їх міцність. Для дослідження впливу характеристик твердого палива й технологічних параметрів термообробки окатишів на їх властивості був вибраний складений і реалізований у лабораторних умовах п'ятифакторний план експерименту. Розроблено математичну модель, яка дає змогу оцінити вплив якості твердого палива на міцність обпалених окатишів. Доведено можливість отримання окатишів із додаванням вугілля з різними характеристиками. Визначено, що можливе використання вугілля зі вмістом летких речовин до 40 %, як заміна коксика, зі зниженням міцності окатишів у межах 20 %. Підтверджено факт зниження міцності окатишів зі збільшенням основності понад 0,5. Запропоновано оптимальні для цих умов технологічні параметри, які дадуть можливість забезпечувати необхідний рівень міцності окатишів за зменшення енергетичних витрат завдяки використанню менш дефіцитних видів палива.

Найкращі показники міцності мають окатиші в разі використання палива крупності (40–71 мкм).

Ключові слова: паливо, окатиші, поліном, математична модель, міцність.

Yaholnyk Maksym, Kovalov Dmytro, Bochka Volodymyr. Research into the possibilities of using different types of solid fuels in the production of pellets

An urgent problem in today's conditions is the improvement of technology and improvement of the qualitative characteristics of iron ore pellets. It is noted that the issue of agglomeration of iron ore materials containing solid fuels with different properties and characteristics has been discussed in sufficient detail in the literature, but some aspects of this issue need to be studied in more detail. The characteristics of solid fuels, such as the content of volatile substances, have a decisive influence on the productivity of the pellet firing process and their strength. To study the influence of solid fuel characteristics and technological parameters of pellet heat treatment on their properties, a five-factor experimental plan was selected, compiled and implemented in laboratory conditions. A mathematical model was developed that allows assessing the influence of solid fuel quality on the strength of roasted pellets. The possibility of obtaining pellets with the addition of coal with different characteristics was proven. It was determined that it is possible to use coal with a volatile substance content of up to 40 % as a replacement for coke, while reducing the strength of pellets within 20 %. The fact of a decrease in the strength of pellets with an increase in basicity above 0.5 was confirmed. The optimal technological parameters for these conditions are proposed, which will allow ensuring the required level of pellet strength while reducing energy costs, due to the use of less scarce types of fuel. The best strength indicators are obtained by pellets when using fuel with a particle size of (40–71 microns).

Key words: fuel, pellets, polynomial, mathematical model, strength.

Вступ. Питання окусування залізорудних матеріалів, що містять вуглець широкої гами видів палива, великого діапазону крупності та кількості, у літературі розглянуті досить докладно [1; 2; 3; 4]. Систематизація наявних відомостей дала змогу виявити фізико-хімічні особливості процесів, що відбуваються під час термообробки цих матеріалів, і встановити слабо вивчені питання. Одне з них полягає у визначенні взаємного впливу процесів окислення, відновлення та дисоціації за спільного нагрівання магнетитового концентрату, вуглецевмісних добавок і вапняку. Головним у цьому питанні є визначення якості твердого палива. Вид палива безпосередньо пов'язаний із вмістом у ньому летких і визначається стадією вуглеутворення.

Остання, зі свого боку, характеризується змінами органічних речовин вугілля під впливом температури та тиску за опускання осадових порід. На першій стадії перебуває торф. Це відносно молоде утворення, що характеризується неупорядкованою структурою. З нього формується буре вугілля, яке переходить у кам'яне і змінюється, починаючи з довгополуменевого. На вищій стадії вуглефікації розташовані антрацити, що володіють найбільш досконалою кристалічною решіткою. За особливих умов вони переходять у графіт. На ступінь нижче за антрацит на стадії вуглефікації перебуває пісне вугілля. Перехідною формою між худим вугіллям та антрацитами є напівантрацити. Найбільш інертними в хімічному сенсі антрацитами є суперантрацити, а перехідною формою між антрацитом і графітом – шунгіт.

З природних матеріалів мінімальні значення виходу летких речовин, втрат органічної маси за термічного розкладання та реакційної здатності твердих продуктів піролізу має антрацит, максимальні – довгополуменеве й газове вугілля. Незважаючи на близькість стадій вуглефікації, пісне вугілля порівняно з антрацитом характеризується значно вищим виходом летких речовин і хімічною активністю. Найбільш низька хімічна активність антрациту з природних матеріалів і значна кількість його запасів висувають цей вид палива як найбільш прийнятний матеріал для шихти залізорудних окатишів із твердим паливом.

Проте на цей час у зв'язку зі зміною традиційних постачальників і покупців увагу зосереджено на вивченні ринку вторинних ресурсів: коксового відсіву, відходів електродного виробництва та ін., які, незважаючи на обмежену кількість матеріалу з певними властивостями, можуть викликати комерційний інтерес.

Вивчення особливостей поведінки цього виду сировини дасть змогу мінімізувати витрати на перехідну стадію відпрацювання технології і таким чином знизити втрати з переходом з однієї технології на іншу.

Іншим питанням, що потребує уточнення, є визначення оптимальної кількості введення вуглецевмісних добавок різної якості в шихту огрудкування змінного хімічного складу.

Окатиші, вироблені за звичайною технологією без добавок твердого палива в початковий період відновлювано-теплової обробки в доменній печі, мають міцність, яка може знижуватися на порядок порівняно з «холодною» міцністю (≥ 200 кг/окатиш). Це пов'язано з тим, що окислені окатиші мають гематитову структуру, яка з перебудовою в кубічні ґрати магнетиту втрачає міцність.

Одним із способів запобігання цьому процесу є добавка твердого палива в шихту для огрудкування. Під час випалення окатишів із шихт з добавками твердого палива розвиваються відновлювальні процеси, унаслідок чого окатиші набувають магнетито-вюститову структуру із силікатними містками як зв'язку. Такі окатиші мають магнетитову структуру, що забезпечує більшу міцність під час відновлювано-теплової обробки в доменній печі через видалення стадії відновлення.

Можливість отримання окатишів з добавкою твердого палива в шихту є актуальною. Комбіноване використання твердого й газоподібного палива для випалу окатишів дає змогу зменшити витрату газоподібного палива та вирівняти властивості окатишів за висотою шару [2].

Метою статті є обґрунтування можливості використання різних видів твердого палива в шихті для виробництва залізорудних окатишів.

Матеріали та методи досліджень. Для комплексної оцінки впливу характеристик твердого палива й технологічних параметрів термообробки окатишів на їх властивості був вибраний складений і реалізований у лабораторних умовах п'ятифакторний план експерименту.

Основним параметром оптимізації в цьому дослідженні була міцність охолоджених обпалених окатишів. Для поліноміального опису процесу було застосовано план Хартлі [5]. У план внесено такі чинники: вміст летких речовин у твердому паливі, крупність твердого палива, температура і тривалість випалу, основність окатишів. Нумерацію факторів вибрали таку:

1. Вміст летких речовин у твердому паливі, % – X_1 .
2. Крупність твердого палива (фракція палива), мкм – X_2 .

3. Температура випалу окатишів у печі, °C – X_3 .

4. Тривалість випалу, хв – X_4 .

5. Основність окатишів, од. – X_5 .

План експерименту визначав проведення 27 дослідів (табл. 1). Порядок проведення всіх 27 дослідів було визначено відповідно до принципу рандомізації.

Характеристику вихідних сировинних матеріалів наведено в таблиці 2. Компоненти шихти були попередньо підготовлені для проведення експериментів. Залізорудний концентрат пропускали через сито 3 мм. Бентоніт, коксик, вугілля, сушили до постійної маси за температури 105 ± 5 . Бентоніт і вапняк подрібнювали до крупності $< 0,071$ мм. Величину коксика та вугілля відповідно до плану експерименту доводили

до крупності $< 0,040$ мм, $0,040\text{--}0,071$ мм та $0,071\text{--}0,100$ мм.

Компоненти шихти дозували в заданих пропорціях і змішували вручну. Вологість шихти в процесі перемішування доводили до 8 %. Отримання окатишів здійснювали на тарілчастому грануляторі протягом 10 хвилин. Відбирали готові окатишів вузького класу діаметром 12 мм, для зменшення впливу крупності на механічні властивості окатишів. Сирі окатиші попередньо сушили до постійної маси за температури 110 ± 5 °C для запобігання руйнації окатишів під час випалення. Режим випалу окатишів був прийнятий з урахуванням плану експерименту. Окатиші витримували в силітовій електропечі за температур 1150, 1200, 1250 °C – 10, 20 та 30 хвилин в окисній атмосфері.

Таблиця 1

План експерименту Хартлі (H_5) для п'яти факторів ($k = 5$)

Номер дослідів	Значення фактора									
	X_1		X_2		X_3		X_4		X_5	
	Код.	Нат.	Код.	Нат.	Код.	Нат.	Код.	Нат.	Код.	Нат.
1	+	40,2	+	71–100	+	1250	+	30	+	0,8
2	–	1,5	–	0–40	+	1250	+	30	+	0,8
3	–	1,5	+	71–100	–	1150	–	10	–	0,1
4	+	40,2	–	0–40	–	1150	–	10	–	0,1
5	–	1,5	+	71–100	–	1150	+	30	+	0,8
6	+	40,2	–	0–40	–	1150	+	30	+	0,8
7	+	40,2	+	71–100	+	1250	–	10	–	0,1
8	–	1,5	–	0–40	+	1250	–	10	–	0,1
9	–	1,5	+	71–100	+	1250	+	30	–	0,1
10	+	40,2	–	0–40	+	1250	+	30	–	0,1
11	+	40,2	+	71–100	–	1150	–	10	+	0,8
12	–	1,5	–	0–40	–	1150	–	10	+	0,8
13	–	1,5	+	71–100	+	1250	–	10	+	0,8
14	+	40,2	–	0–40	+	1250	–	10	+	0,8
15	+	40,2	+	71–100	–	1150	+	30	–	0,1
16	–	1,5	–	0–40	–	1150	+	30	–	0,1
17	0	20,85	0	40–71	0	1200	0	20	0	0,45
18	+	40,2	0	40–71	0	1200	0	20	0	0,45
19	–	1,5	0	40–71	0	1200	0	20	0	0,45
20	0	20,85	+	71–100	0	1200	0	20	0	0,45
21	0	20,85	–	0–40	0	1200	0	20	0	0,45
22	0	20,85	0	40–71	+	1250	0	20	0	0,45
23	0	20,85	0	40–71	–	1150	0	20	0	0,45
24	0	20,85	0	40–71	0	1200	+	30	0	0,45
25	0	20,85	0	40–71	0	1200	–	10	0	0,45
26	0	20,85	0	40–71	0	1200	0	20	+	0,8
27	0	20,85	0	40–71	0	1200	0	20	–	0,1

Таблиця 2

Хімічний склад шихтових матеріалів

Матеріали	Вміст, %								
	Fe _{общ.}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Інші оксиди	ВПП
Залізорудний концентрат	63,84	27,40	60,92	9,01	1,03	0,65	0,34	–	0,65
Бентоніт	4,30	0,51	5,56	60,90	1,89	13,60	1,76	4,08	11,70
Вапняк	0,28	–	0,40	1,34	53,22	0,56	0,92	–	43,56
Зола коксика	12,66	–	18,09	49,42	4,48	26,61	1,40	–	–
Зола вугілля	4,56	–	6,51	53,40	1,20	30,26	1,52	7,11	–

Опір стиску вологих і висушених окатишів визначали за методом, заснованим на одно-вісному стисканні одиничного окатиша й визначенні статичного навантаження, за якого відбувається його повне руйнування. Міцність на удар визначали скиданням окатиша з висоти 0,5 м на сталеву плиту до повного руйнування окатиша. Показники міцності визначали як середнє арифметичне за результатами випробувань 5 окатишів.

Кожну пробу охолоджених обпалених окатишів випробовували на міцність. Опір стиску визначали на розривній машині, що працює за принципом стиснення. Показник міцності обпалених окатишів визначали як середнє арифметичне за результатами випробувань 5 окатишів. Отримані таким чином дані були використані для розробки математичної моделі, яка дає змогу оцінити вплив якості твердого палива на міцність обпалених окатишів.

Результати досліджень. Результати експериментів наведено в табл. 3 для всіх 27 проведених дослідів.

Таблиця 3

Характеристики міцності окатишів

Номер дослідів	Міцність на удар, разів		Опір стиску, кг/окатиш		
	Сирі	Сухі	Сирі	Сухі	Обпалені
1	2,8	1,0	0,75	1,06	83,25
2	2,6	1,0	1,05	1,32	105,75
3	2,0	1,0	0,69	0,94	130,0
4	1,8	1,0	0,73	0,74	147,66
5	2,2	1,0	0,86	0,89	53,80
6	2,8	1,0	0,82	0,99	55,0
7	2,0	1,0	0,72	1,04	119,75
8	2,2	1,0	0,66	0,83	141,25
9	2,0	1,0	0,69	0,94	146,66
10	1,8	1,0	0,73	0,74	84,50
11	2,8	1,0	0,75	1,06	46,20
12	2,6	1,0	1,05	1,32	55,33
13	2,2	1,0	0,86	0,89	131,0
14	2,8	1,0	0,82	0,99	76,75
15	2,0	1,0	0,72	1,04	68,0
16	2,2	1,0	0,66	0,83	114,25
17	2,2	1,0	0,78	1,34	96,66
18	3,0	1,0	0,72	1,25	102,25
19	2,6	1,0	0,74	1,14	108,4
20	2,4	1,0	0,68	0,88	78,25
21	3,2	1,0	0,72	1,13	71,50
22	2,2	1,0	0,78	1,34	70,20
23	2,2	1,0	0,78	1,34	103,33
24	2,2	1,0	0,78	1,34	109,0
25	2,2	1,0	0,78	1,34	95,33
26	2,4	1,0	0,78	1,43	98,0
27	2,2	1,0	0,74	1,0	115,50

Для підрахунку опору стиску обпалених окатишів було враховано вплив тріщин на поверхні окатишів, такі окатиші мали набагато меншу міцність. Дані щодо міцності таких окатишів не враховували. За отриманими експериментальними значеннями міцності обпалених окатишів було складено математичну модель.

Використовуючи розрахункові коефіцієнти для плану Хартлі (Ha_5), обчислили коефіцієнти регресії полінома [5].

Підставивши знайдені коефіцієнти регресії у формулу поліному

$$Y = B_0 + \sum_1^k B_i x_i + \sum_1^k B_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^k B_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (1)$$

отримали поліном, що відображає залежність опору стиснення обпалених окатишів (y) моделі від перерахованих вище факторів (x):

$$\begin{aligned} Y = & 95,039528 - 10,707745x_1 - 0,03050244x_2 + \\ & + 9,7302228x_3 - 7,4155932x_4 - 19,561565x_5 + \\ & + 10,496783x_1^2 - 19,953217x_2^2 - 8,0632166x_3^2 + \\ & + 7,336783x_4^2 + 11,92178x_5^2 - 5,07375x_1x_2 - \\ & - 7,0925x_1x_3 - 3,255x_1x_4 + 1,0725x_1x_5 + \\ & + 18,10875x_2x_3 - 1,51x_2x_4 + 3,4425x_2x_5 + \\ & + 1,82125x_3x_4 + 10,28625x_3x_5 + 7,76125x_4x_5. \end{aligned} \quad (2)$$

Перевірка адекватності математичної моделі реальному процесу проводилася за допомогою критерію Фішера [5]:

$$F_{\text{розн.}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_{\text{он}}^2}. \quad (3)$$

За $F_{\text{розн.}} < F_{\text{табл.}}$ адекватність обґрунтована. Критерій Фішера:

$$F_{\text{розн.}} = \frac{185,2997}{44,2593} = 4,187 < 4,53 = F_{\text{табл.}} \quad (4)$$

Отже, модель адекватна, тобто поліном досить точно описує процес зміни міцності обпалених окатишів під впливом різних факторів.

Графічну інтерпретацію отриманих результатів наведено на рис. 1–5.

Аналіз даних, наведених на рис. 1, показує, що вміст легких речовин у твердому паливі значно впливає на міцність окатишів. Так, за вмісту легких 1,5% (з використанням коксика) спостерігається максимальна міцність – 116,2 кг/окат. Зі збільшенням вмісту легких в інтервалі 20–40 % міцність знижується до 94–95 кг/окат. Це можна пояснити збільшенням пористості готових окатишів. Легкі речовини твердого палива в шарі, що спікається, не згорають. У зв'язку із цим збільшується пористість обпалених окатишів, а міцність окатишів знижується [2].

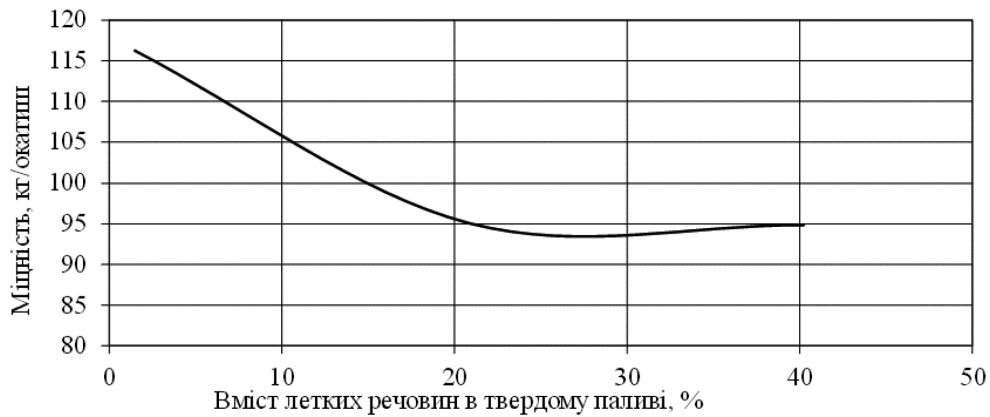


Рис. 1. Залежність міцності окатишів від вмісту летких речовин у твердому паливі

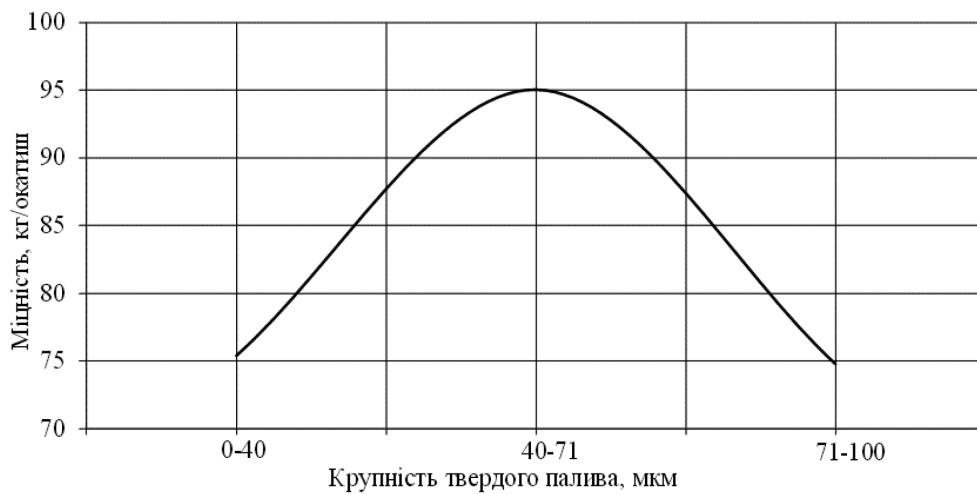


Рис. 2. Залежність міцності окатишів від крупності твердого палива

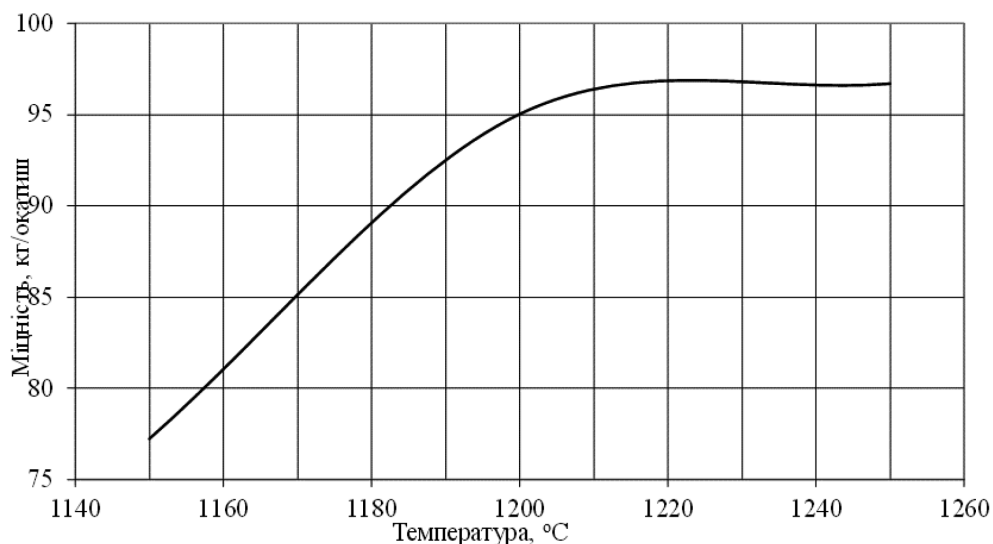


Рис. 3. Залежність міцності окатишів від температури випалу

У процесі випалу відбувається зміна хімічної будови та фізичної структури вугілля. Термічному розкладанню органічної маси вугілля передують процеси видалення гігроскопічної вологи й адсорбованих газів, що протікають

у температурному інтервалі 100–250 °C. Ці процеси можна не враховувати під час аналізу впливу летких речовин на міцність залізорудних окатишів, тому що за вибраною методикою вугілля було попередньо висушене до постійної

маси за температури 105 ± 5 °С. У літературі підкреслюється ефективність попереднього прогріву вугілля до температур 300–350 °С [6].

З підвищенням температури поряд зі збільшенням виходу газу (летких речовин) спостерігається і зміна його складу. У зв'язку із цим зростає пористість твердого залишку вугілля, водночас він збагачується вуглецем, тому тверді продукти піролізу мають високу реакційну здатність. Розкладання вугілля відбувається переважно відразу до твердих конденсованих і газоподібних речовин, минаючи стадію рідких компонентів.

Висока пористість окатишів пояснюється високою швидкістю їх нагріву, з опусканням окатишів у силітову піч під час випалення. Швидкісне нагрівання сприяє збільшенню пористості та питомої поверхні твердого залишку. Так, у разі нагрівання бурого вугілля зі швидкістю 500 °С/с середній розмір пор в 1,5–2 рази, а середня товщина стінок пор у 3–5 разів менше, ніж у разі повільного нагрівання. Газова фаза летких за своїм складом – змістом CO , CO_2 , CH_4 , H_2 і H_2O – вища за рівноважну перших двох стадій відновлення оксидів заліза [7], тобто дає змогу здійснити процес відновлення магнетиту до вюститу.

Леткі речовини подвійно впливають на поведінку вугілля під час випалення залізорудних окатишів. З одного боку, леткі із співвідношенням CO/CO_2 і $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ вище за рівноважні для відновлення на перших двох стадіях прискорюють відновлення. З іншого боку, вони чинять і непрямий вплив на процес відновлення – видалення летких сприяє отриманню твердого залишку з розвиненою внутрішньою поверхнею, що прискорює газифікацію вуглецю.

Істотний вплив на міцність окатишів має крупність твердого палива. Для проведення експериментів було вибрано 3 фракції твердого

палива – 0–40, 40–71 і 71–100 мкм. Дослідження показали, що оптимальною є фракція 40–71 мкм, з якою міцність окатишів залишалася 95 кг/окатишів (рис. 2). Ця залежність може спостерігатися тільки для конкретних умов, проте визнаним є факт, що у виробництві окатишів тверде паливо потрібно подрібнювати до крупності менше за 71 мкм. При цьому частинки палива швидко запалюються, а перерозподіл теплоти за висотою шару відбувається з меншою швидкістю.

Міцність окатишів залежить від температури та часу їх випалу. Тут також варто врахувати вплив пористості обпалених окатишів. Вважається, що пористість формується під час випаровування води із сирих окатишів, вигорання частинок твердого палива та видалення з вапняку. Аналіз впливу температури випалу на міцність (рис. 3) показує, що за температури випалу 1150 °С маємо міцність 77,2 кг/окат., за 1200 °С – 95 кг/окат. та за 1250 °С – 96,7 кг/окат. відповідно. Ці дані можна порівняти з даними, наведеними в літературі [2], коли збільшення температури випалу знижує пористість і відповідно збільшується міцність готових залізорудних окатишів.

Зворотна залежність спостерігається під час розгляду впливу часу випалювання на міцність (рис. 4). Мінімуму часу випалення 10 хв відповідає найбільша міцність 109,8 кг/окат. Це пояснюється тим, що за тривалого часу випалу 20 і 30 хв відбувається майже повне вигорання вуглецю і дисоціація флюсуючих добавок, що збільшує пористість, зменшуючи міцність готового окатишу. Однією з найважливіших причин, що призводять до втрати залізорудними матеріалами міцності, є кристалохімічні перетворення.

Аналізуючи вплив основності (рис. 5) на міцність окатишів, варто враховувати, що оптимальна

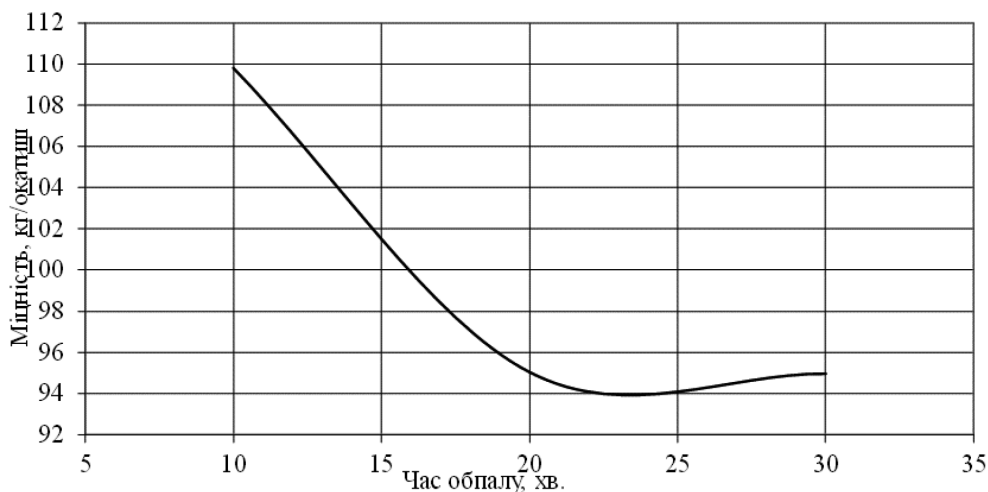


Рис. 4. Залежність міцності окатишів від часу випалу

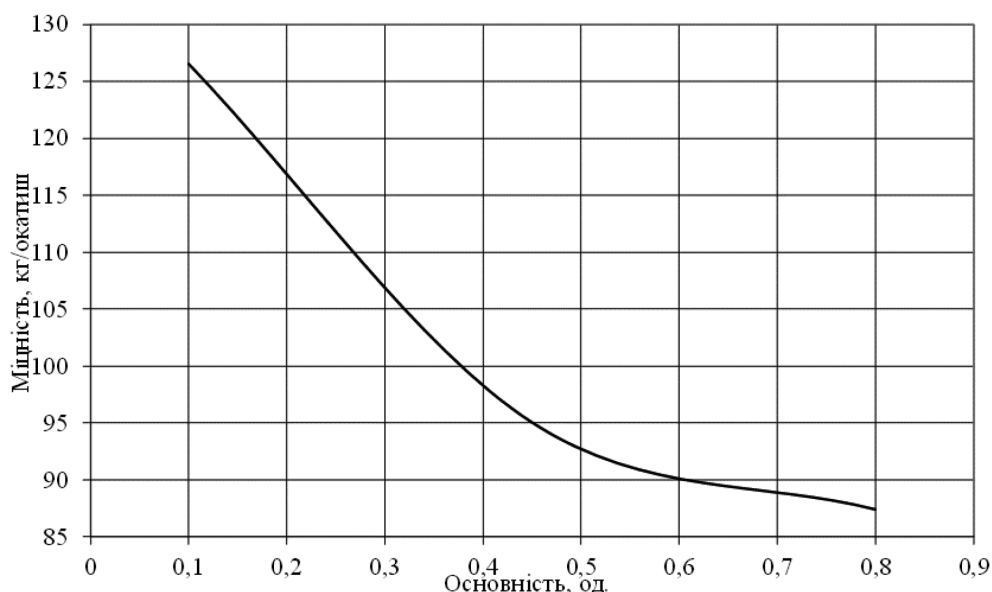


Рис. 5. Залежність міцності окатишів від основності окатишів

добавка вапняку залежить від рівноваги факторів: збільшення кількості розплаву сприяє зниженню пористості, а виділення газу збільшує пористість. Зі збільшенням основності інтенсивність ущільнення матеріалу відстає від інтенсивності утворення пор, тому що збільшується температура плавлення матеріалу [2], що відповідає результатам дослідження. Для неофлюсованих окатишів міцність перебуває на рівні 126,5 кг/окат., знижуючись для основності 0,45 до 95,0 кг/окат. і для основності 0,8 до 87,4 кг/окат. відповідно.

Висновки. Досліджено характеристики вугілля різних марок. Показано можливість

отримання окатишів з добавкою вугілля з різними характеристиками як джерела вуглецю.

Складено та реалізовано п'ятифакторний план експерименту, і аналіз експериментальних даних показав, що можливе використання вугілля з вмістом летких речовин до 40% як заміни коксика зі зниженням міцності окатишів у межах 20 %.

Підтверджено факт зниження міцності окатишів зі збільшенням основності понад 0,5. Найкращі показники міцності мають окатиші в разі використання в шихті твердого палива крупності (40–71 мкм).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Чернега Д. Ф., Нещадим В. М., Кудь П. Д., Іванченко Д. В. Дослідження процесу спікання залізородних котунів із підвищеним вмістом твердого палива. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»: науково-технічний журнал*, 2013. № 2 (88). С. 124–128. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7127>
2. Бережний М. М., Мовчан В. П. Збагачення та окускування сировини. Кривий Ріг, 2000. 368 с.
3. Kieush L., Boyko M., Koveria A., Yaholnyk M., Poliakova N. Production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2021. No. 27 (4). P. 167–171. <https://doi.org/10.36547/ams.27.4.1052>
4. Ковальов Д. А., Ванюков А. А., Безшкуренко О. Г., Дворковий О. І. Дослідження ефективності часткової заміни природного газу твердим паливом для випалу залізородних окатишів. *Теорія і практика металургії*, 2019. № 3. С. 18–23. <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.03>
5. Білецький В. С., Смирнов В. О. Моделювання процесів збагачення корисних копалин. Донецьк : Східний видавничий дім, 2013. 304 с.
6. Малий Є. І., Старовойт М. А. Модифікація вугілля і вугільної шихти для підвищення якості коксу як доменного палива. *ВуглеХімічний журнал*, 2013. № 3–4. С. 8–16. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukhj_2013_3-4_4
7. Robinson, R. High Temperature Properties of By-Product cold bonded pellets containing Blast Furnace Flue Dust. *Thermochimica Acta*, 2005. No. 432. P. 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.04.015>

REFERENCES:

1. Cherneha, D. F., Neshchadym, V. M., Kud, P. D., & Ivanchenko, D. V. (2013). Doslidzhennia protsesu spikannia zalizorudnykh kotuniv iz pidvyshchenym vmistom tverdoho palyva [Investigation of Iron Ore Pellets Sintering with High-Content of Solid Fuels]. *Naukovi visti NTUU "KPI": naukovo-tekhnichnyi zhurnal*, 2(88), 124–128. Retrieved from: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7127> [in Ukrainian].

2. Berezhnyi, M. M., & Movchan, V. P. (2000). Zbahachennia ta okuskuvannia syrovyny [Enrichment and agglomeration of raw materials]. *Kryvyi Rih* [in Ukrainian].
3. Kieush, L., Boyko, M., Koveria, A., Yaholnyk, M., & Poliakova, N. (2021). Production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks. *Acta Metallurgica Slovaca*, 27(4), 167–171. <https://doi:10.36547/ams.27.4.1052>
3. Kovalov, D. A., Vaniukov, A. A., Bezshkurenko, O. H., Dvorkovyi, O. I. (2019). Doslidzhennia efektyvnosti chastkovoї zaminy pryrodnoho hazu tverdym palyvom dlia vypalu zalizorudnykh okatyshiv [Study of the efficiency of partial replacement of natural gas solid fuel for firing iron ore pellets]. *Teoriia i praktyka metalurhii*, 3, 8–23. <https://doi.org/10.34185/tpm.3.2019.03> [in Ukrainian].
4. Biletskyi, V. S., & Smyrnov, V. O. (2013) Modeliuvannia protsesiv zbahachennia korysnykh kopalyn [Modeling of mineral enrichment processes]. Donetsk: Skhidnyi vydavnychy dim [in Ukrainian].
5. Malyi, Ye. I., & Starovoi, M. A. (2013). Modyfikatsiia vuhillia i vuhilnoi shykhty dlia pidvyshchennia yakosti koksu yak domennoho palyva [Modification of coal and coal charge to improve the quality of coke as a blast furnace fuel]. *VuhleKhimichnyi zhurnal*, 3–4, 8–16. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukhj_2013_3-4_4 [in Ukrainian].
6. Robinson, R. (2005). High Temperature Properties of By-Product cold bonded pellets containing Blast Furnace Flue Dust. *Thermochimica Acta*, 432, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.04.015>