

УДК 669.168:669.052

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.11>

Мяновська Я.В., Пройдак Ю.С., Камкіна Л.В., Бабенко О.В., Колбін М.О.

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ І РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ СПІКАННЯ АГЛОМЕРАТУ ОСНОВНІСТЮ 1,6 З ЗАСТОСУВАННЯМ РУДИ РОДОВИЩА СУХА БАЛКА

Myanovska Ya., Projdak Yu., Kamkina L., Babenko O., Kolbin M.

PHYSICOCHEMICAL PRINCIPLES AND IMPLEMENTATION OF THE TECHNOLOGY FOR PRODUCING FLUXED AGGLOMERATE USING ORE THE SUKHA BALKKA FIELD

Розглянуто загальні закономірності і механізм процесу агломерації залізної руди з урахуванням перетворень, що протікають при спіканні і за участю компонентів гетерогенних систем. Показано що в гетерогенних системах при спіканні значний вплив на зміненні мінералогічного складу готового агломерату впливає кількість введеної руди та CaO за рахунок яких формуються фази, які забезпечують достатню міцність готового продукту. Як показали дослідження мікроструктури, поява у структурі агломерату феритів кальцію між зернами магнетиту та зменшення кількості силікатного скла підвищує міцність агломерату. Аналіз результатів спікання показує, що значного впливу на міцність дослідного агломерату заміна концентрату рудою не має. Однак при спів-відношенні руда/концентрат 9/1 збільшується час при якому досягається максимальна температура газів що відходять, що може бути пов'язано зі змінням порізності шару шихти при використанні більш крупних частинок залізної руди. Отримання агломерату заданої основності та властивостей здійснюється при крупності вапняку та твердого палива в межах 0-3мм, крупність залізорудного концентрату до 0,1 мм, залізна руда використовувалась без розсіву за фракціями, вологість шихти 7 - 8%, витрата твердого палива на процес 6 - 8%. Позитивний вплив заміни залізорудного концентрату залізною рудою родовища «СУХА БАЛКА» може бути пов'язаний з хімічним складом руди, яка є багатою рудою та містить оксид алюмінію та оксид магнезю. Оксид алюмінію сприяє утворенню алюмосилікофериту кальцію та забезпечує достатню металургійну міцність агломерату. Кількість магнетиту зменшувалась, оскільки він витрачався на утворення алюмосилікофериту. Крім того, при кристалізації магнезій входить в ґратки двухальцьевого силікату та запобігає поліморфному перетворенню $\beta 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow \gamma 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, що також впливає на міцність агломерату.

Ключаві слова: агломерат, спікання, флюс, структури, міцність, технологія.

The general regularities and mechanism of the process of sintering of iron ore are considered, taking into account the transformation occurring during sintering and with the participation of components of heterogeneous systems. It is shown that in heterogeneous systems during sintering significant influence on the change of mineralogical composition of the finished agglomerate is influenced by the amount of introduced ore and CaO due to which the phases are formed, which provide sufficient strength of the finished product. Microstructure studies have shown that the appearance of calcium ferrite agglomerates between magnetite grains and a decrease in the amount of silicate glass increases the agglomerate strength. Analysis of the sintering results shows that the ore substitution has no significant effect on the strength of the test sinter. However, with the ratio of ore / concentrate 9/1, the time at which the maximum temperature of the exhaust gases is reached is increased, which may be due to the change in the porosity of the charge layer when larger particles of iron ore are used. Obtaining agglomerate of a given basicity and properties is carried out at the size of limestone and solid fuel within 0-3mm, the size of the room-ore concentrate to 0.1 mm, iron ore was used without sieving by fractions, the humidity of the charge 7 - 8%, the consumption of solid fuel for the process 6 - 8%. The positive effect of the replacement of iron ore concentrate with the iron ore deposit "SUKHA BALKKA" may be related to the chemical composition of the ore, which is rich in ore and contains aluminum oxide and magnesium oxide. Aluminum oxide promotes the formation of calcium $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ and provides sufficient metallurgical strength for the agglomerate. The amount of magnetite decreased as it was spent on the formation of aluminosilicopherite. In addition, during crystallization, magnesium enters the lattice of two-calcium silicate and prevents the polymorphic transformation of $\beta 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow \gamma 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, which also affects the strength of the agglomerate.

Key word: sinter, sintering, flux, structures, strength, technology

Отримання якісних офлюсованих агломератів є актуальною проблемою сучасної чорної металургії, оскільки в більшості країн світу залізорудний агломерат залишається основною сировиною для доменної плавки. В цілому процесу агломерації передують видобуток і збагачення залізної руди, приймання та складування сировини, складання складу шихти в залежності від вимог виробництва кінцевого продукту, грануляція шихти, технологічні

умови спікання огрудкованої шихти, обробка готового спека.

В даний час велика частина виплавленого в світі чавуну отримана з огрудкованої залізорудної сировини - агломерату та обкотишів. Частка їх в залізорудній частині доменної шихти з кожним роком зростає і за останніми даними становить 95%. Основна причина такого поширення огрудкованих залізорудних матеріалів полягає в можливості ці-

Мяновська Яна Валеріївна – к.т.н., доцент НМетАУ,
Пройдак Юрій Сергійович – д.т.н., професор, проректор НМетАУ,
Камкіна Л.В. – д.т.н., професор НМетАУ,
Бабенко Олександр Вікторович – к.т.н., доцент НМетАУ
Колбін Миколай Олександрович – к.т.н., доцент НМетАУ

Myanovska Ya. - CTS assistant professor NMetAU
Projdak Yu - d.t.s. Professor Vice rector NmetAU
Kamkina L. - d.t.s. Professor NMetAU
Babenko O. - CTS assistant professor NMetAU
Kolbin M. - CTS assistant professor NMetAU

леспрямовано змінювати склад і властивості вихідної сировини, найбільш поєднуючи їх з вимогами подальшого металургійного переділу.

Залучення в експлуатацію нових родовищ, в основному складених бідними залізними рудами, збагачення яких вимагало дрібного і тонкого подрібнення, поставило перед гірничою та металургійною промисловістю питання огрудкування дрібниці в число першочергових проблем [1]. Поява значної кількості різних способів огрудкування, що відрізняються не тільки деталями, а й принципами, спричинило за собою необхідність вивчення всіх можливостей і особливостей процесів отримання огрудкованої сировини, контролю металургійних властивостей, так як без цього неможливо було визначити переваги і недоліки матеріалів, виготовлених за різними технологічними принципами і придатність їх використання в доменній печі [2].

Очевидно, що і в найближчій перспективі в більшості вітчизняних і зарубіжних підприємств агломерат залишиться одним з основних компонентів доменної шихти. У зв'язку з цим, як і в попередні роки, перед вченими і технологами будуть стояти два головних та актуальних завдань - поліпшення якості агломерату та зниження паливно-енергетичних витрат на його виробництво. Ускладнення умов для вирішення цих проблем пов'язано як з деякою зміною уявлень про найбільш важливі показники якості, так і з практичною реалізацією більшості очевидних технологічних заходів по підвищенню холодної міцності агломерату і скорочення витрати палива на процес спікання.

Однак, вже наявні результати теоретичних і прикладних досліджень В.І.Коротіча [1], С.В.Базілевіча, Е.Ф.Вегмана [2], А.А.Сігова і В.А.Шурхала [3], Г.Г.Ефіменко, Д.А.Ковальова [4] і ряду інших, свідчили про принципову можливість управління окремими показниками якості готового продукту, який одержували в будь-яких шихтових умовах. Сировинна база ПАТ Суха Балка представлена покладами багатих залізних руд в основному мартитового, рідше - гематитового складу [5, 6], запаси яких розвідані до глибини 2060 м. в полі шахти «Ювілейна» і до глибини 1500 м в полі шахти ім. Фрунзе. Запаси розвіданих корисних ресурсів на двох шахтах, за оцінками даними, становлять 75 млн тонн і можуть забезпечити роботу комбінату на найближчі 25 років. Вміст заліза в товарній руді варіюється в межах 58-62%. У 2018 році на підприємстві освоїли випуск нової високоякісної продукції з вмістом заліза до 64%. Крім багатих залізних руд, в полях шахт є значні запаси магнетитових кварцитів - більш 580 млн тонн, забезпеченість якими досягає декількох сот років. Наявність багатой залізної руди вилучає з ланки підготовки стадію збагачення, при якій утворюється значна частка дрібнодисперсного матеріалу. Актуальним завданням стало дослідження та встановлення раціональних параметрів спікання при прямому застосуванні в процес агломерації залізної руди.

Огляд наявної наукової інформації.

Теорія формування блоків, запропонована Е.Ф.Вегманом [2], пов'язує їх походження з утворенням згустків розплаву навколо палаючих частинок коксового дріб'язку. У пирозі агломерату блокова текстура шматків найбільш чітко проявляється у верхній і, особливо, в середній його частинах. Поблизу колосникових ґраток тепловий рівень процесу зростає, тому тут утворюється монолітний литий шматок агломерату. При перевантаженнях і транспортуванні агломерату, як показали дослідження Е. Ф. Вегмана, Е. Г. Бушиної і Н. К. Корнілової [7], в першу чергу руйнуються зв'язки між блоками. При цьому шматок агломерату розсипається на окремі блоки або на їх групи (процес «індивідуалізації»). Що стосується самих блоків, то вони є міцними утвореннями з литою концентрично-зональною структурою. Для їх руйнування потрібні витрати значної кількості енергії. Оскільки блоки формуються навколо палаючих частинок твердого палива, їх розмір визначається розміром паливних частинок. Тонкі частинки коксового дріб'язку (<0,5 мм) згоряють дуже швидко і не можуть створити навколо себе блоків. Оптимальними, з точки зору міцності, є блоки розміром 15-20 мм, що виникають навколо частинок коксового дріб'язку діаметром 1-3 мм [8].

Крім текстури агломерату, на його міцність великий вплив має і мінералогічний склад спека [2]. Присутність в шматках агломерату залишків шихти, гематиту, магнетиту, кварцу значно послаблює шматок. Особливо шкідливо діють включення вапняку і вапна. Шкідливий вплив на міцність агломерату надає також присутність в його структурі крихкого скла, особливо двухкальцієвого силікату. Останній при охолодженні шматка агломерату знає поліморфного перетворення $\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4 \rightarrow \gamma\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$ (675°C), в ході якого об'єм цієї фази зростає на 11-12%. Це створює величезну внутрішню напругу в шматку агломерату, його міцність різко знижується [8].

Міцність спека починає різко знижуватися з основності 0,4-0,5, при якій в структурі агломерату з'являється Ca_2SiO_4 . Мінімальна міцність агломерату відповідає основності 1,3-1,5. Подальше збільшення основності приводить до появи Ca_3SiO_5 , не схильного до поліморфних перетворень. Зменшується кількість крихкого скла, з'являється нова міцна зв'язка - феррити кальцію; структура агломерату (всередині блоків) стає більш однорідною. Все це сприяє підвищенню міцності агломерату. Таким чином, високоосновний агломерат (залізофлюс) виявляється таким же міцним, як не офлюсований агломерат. Вочевидь, високо основний агломерат позитивно впливає на технологію виплавки чавуну, оскільки зникає необхідність введення в якість флюсу вапняк, який потребує на дисоціацію певну кількість теплоти та змінює тепловий стан доменної печі.

Добавки в агломераційну шихту руд з глиноземистою порожньою породою, дозволяють підви-

щити основність, при якій в структурі агломерату з'являються силікати кальцію, тобто зменшити їх кількість в агломераті, підвищити міцність спека. Н. М. Якубцінер [9] встановив, що на міцність спека сприятливо впливає присутність доломітизованого вапняку (Ca, Mg) CO₃ в шихті. Магній при кристалізації входить в грати Ca₂SiO₄ і запобігає поліморфному перетворення β-Ca₂SiO₄ -> γ-Ca₂SiO₄. В даний час доломітизований вапняк додають в агломераційну шихту на більшості аглофабрик світу. Однак агломерат руйнується ще й в самій доменній печі при нагріванні і відновленні («гаряча міцність»).

Стосовно до офлюсованого агломерату експериментально встановлено негативний вплив присутності гематиту і скла на його гарячу міцність. Гематит при нагріванні в відновлювальній атмосфері змінює питомий об'єм, збільшуючи внутрішню напругу, і руйнується внаслідок анізотропії відновлення. Скло зберігає крихкість аж до 600-700°C, коли стає пластичним і релаксує напруги. Таким чином, присутність скла шкідливо позначається не тільки на холодній, але і на гарячій міцності агломерату. У невеликому ступені на відновлюваність впливає і мінералогічний склад агломерату. Зокрема, відновлюваність знижується, якщо в агломераті присутні важковідновні фази: фаяліт Fe₂SiO₄, Са-олівін, браунміллер 4CaO-Al₂O₃Fe₂O₃ і скло. Відновлюваність офлюсованого агломерату змінюється зі збільшенням основності по екстремальній залежності. Максимум відновлюваності відноситься до агломерату основності (CaO/SiO₂) 1,4-1,5. Як показав досвід, відновлюваність офлюсованого агломерату в даний час відповідає сучасним вимогам доменної технології. Температура початку розм'якшення в відновлювальній атмосфері неофлюсованих агломератів основністю (CaO/SiO₂) 0,5-0,7 і офлюсованих, основністю 2-4 становить відповідно 1050-1150 і 1200-1250°C. Мінімальна температура початку розм'якшення відповідає максимальній кількості скла в агломераті основністю 0,5-0,7, так як скло, яке не має фіксованої точки плавлення, розм'якшується в широкому інтервалі температур [8].

Використання залізних руд і палива нових родовищ, нових видів відходів в технологіях агломерації вимагають попереднього техніко-економічного і екологічного аналізу і оцінки, в результаті чого можуть бути відібрані найбільш оп-

тимальні по питомій витраті палива і передбачуваним технологічними показниками якості продуктом варіанти майбутньої технології виробництва агломерату. Іншими словами, такий підхід дозволяє визначити ті компоненти доступного сировини і приготувати з них суміші, які будуть відповідати вимогам виробництва якісного агломерату для виплавки чавуну в доменній печі або для інших технологій металургії заліза, основу для проведення такого аналізу становлять математичні моделі.

Експериментальні дослідження. Вихідні данні до розрахунку аглошихти

Розрахунок шихти здійснювали для співвідношень «руда:концентрат» при поступовому заміщенні кількості концентрату на рудну складову. Кількість флюсу розраховували виходячи з досягнення основності 1,6 з урахуванням загальної кількості компонентів руди та концентрату. Колошниковий пил, шлами та зворот задавались у постійній кількості. Розрахунок матеріального балансу проводили для 3 кг вихідної шихти: основність агломерату визначали за виразом

$$b = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = 1,6; \text{ вміст } FeO \text{ в агломераті, \% дорівнював } 12,5,$$

Співвідношення компонентів в рудній частині шихти : концентрат, частка, прийнято 1, руда Fe60, частка 9; 6; 3. Інші компоненти давали у шихту в кількостях : уолошниковий пил - 5%; коксовий дріб'язок 7%, шлами 5%. Кількість флюсу (вапно) змінювалась у відповідності з моделюванням.

Тепловий баланс процесу агломерації проводили по методу Е.Ф.Вегмана [10, 11].

Спікання агломераційних шихт виконували у відповідності з трьох факторним планом експерименту Бокса-Бенкіна (центральне композиційне ортогональне планування другого порядку для трьох факторного експерименту) [12]. Це потребувало встановлення областей визначення всіх факторів та інтервалів варіювання: різниця максимального і мінімального значень кожного фактора в натуральному вигляді. Після вибору інтервалу варіювання на основі стандартних матриць складається ядро факторного експерименту. Виходячи з існуючих поглядів на реалізацію процесу агломерації залізородної сировини та побудови плану експерименту вибирали фактори такі, які не мають взаємного впливу одне на одного.

Таблиця 1 План Бокса-Бенкіна (В-В3) для k=3.

Номер досліджу	Фактор			Номер досліджу	Фактор			Номер досліджу	Фактор		
	X1	X2	X3		X1	X2	X3		X1	X2	X3
1	+	+	0	5	+	0	+	9	0	+	+
2	+	-	0	6	+	0	-	10	0	+	-
3	-	+	0	7	-	0	+	11	0	-	+
4	-	-	0	8	-	0	-	12	0	-	-
								13	0	0	0

Теоретичне визначення характеристик міцності дослідних агломератів

Для одержання рівнянь, що описують залежність міцності і металургійних властивостей агломерату, заданої за умовою технічного завдання

основністю 1,6, з максимальним залученням до складу шихти залізної руди і мінімальним вмістом залізородного концентрату, в якості факторів обираємо: співвідношення залізна руда/залізородний концентрат (Р/К) (X1); вміст флюсу (вапняку) (I) (X2); вміст палива (коксику) (Т) (X3).

Інтервали варіювання для раніше обраних факторів обирались на основі дольового співвідношення Р/К: 90/10 (9:1) - максимальна заміна (верхній рівень), 75/25 (3:1) - мінімальна заміна (нижній рівень).

Таблиця 2. Орієнтовні варіанти шихти основністю 1,6 з мінімальним залученням концентрату і варіанти з урахуванням введення до складу шихти колошнікового пилу і шламу

	Варіант 1, %	Варіант2, %	Варіант 3, %	Варіант 4, %	Варіант 5, %	Варіант 6, %
Концентрат	2	0	0	0	0	2
Руда	50	50	42	43	44	42
Вапняк	20	20	18	18	19	18
Паливо	8	8	8	7	7	7
Зворот	20	22	22	22	22	21
Колошн. пил			5	5	5	5
Шлам			5	5	5	5
Основність	1,565	1,597	1,603	1,59	1,635	1,583

Таблиця 3 Інтервали варіювання факторів

Фактор	X ₁ (Р/К), -	X ₂ (I), %	X ₃ (Т), %
Рівень	верхній	9 (90/10)	8
	нульовий	6 (85,7/14,3)	7
	нижній	3 (75/25)	6
Інтервал варіювання	3	5	1

Коефіцієнти регресії визначали після реалізації плану по формулам:

$$b_i = T_3 \sum_1^n x_i y_i \quad (1)$$

$$b_{ij} = T_6 \sum_1^n x_i x_j y_i \quad (2)$$

$$b_{ii} = T_4 \sum_1^n x_i^2 y_i + T_5 \sum_1^k \sum_1^n x_i^2 y_i - T_2 \sum_1^n y_i \quad (3)$$

Невипадковість значень параметрів оптимізації перевіряли на однорідність дисперсій за критерієм Кохрена. Підрахунок дисперсії результатів

повторених дослідів і порівняння їх максимальної дисперсії з сумою показало, що отриманий результат 0,09044 менше критичного, тобто однорідність дисперсій доведена.

Використовуючи розрахункові коефіцієнти T_i обчислили коефіцієнти регресії полінома. Значення індексу на удар від співвідношення вмісту руди і концентрату, вмісту флюсу і палива описується в кодованому вигляді рівнянням :

$$Y = 88 + 0,64313X_1 + 1,15625X_2 - 0,3126X_3 + 1,375X_1X_2 - 1,3388X_1X_3 + 0,1875X_2X_3 - 0,2006X_1^2 + 1,0762X_2^2 - 1,1381X_3^2$$

Для перевірки адекватності полінома експериментальним даним визначали розрахункові значення параметра оптимізації, дисперсію адекватності, дисперсію, критерій Фішера:

Порівняння отриманого значення F_{розра}=1.9841 з F_{табл}^{0,05}=3,63 показало, що розрахункове значення нижче критичного, тобто, отриманий поліном адекватно описує залежність індексу на удар від спів-

відношення вмісту руди і концентрату, вмісту флюсу і палива і його можна переводити в натуральний (фактичний) вид.

Таким чином, значення індексу на удар від співвідношення вмісту руди і концентрату, вмісту флюсу і палива описується в натуральному вигляді поліномом :

$$\text{Іну} = 88 + 0,64313[(P/K-6)/3] + 1,15625[(I-20)/5] - 0,3126[(T-7)/1] + 1,375[(P/K-6)/3][(I-20)/5] - 1,3388[(P/K-6)/3][(T-7)/1] + 0,1875[(I-20)/5][(T-7)/1] - 0,2006[(P/K-6)/3]^2 + 1,0762[(I-20)/5]^2 - 1,1381[(T-7)/1]^2$$

де Р/К – співвідношення руда/концентрат, I – вміст вапняку, % , Т – вміст палива , %. Виходячи з одержаного полінома, який є математичним описом впливу вапняку, палива та співвідношення руда/концентрат, можлива якісна цього впливу. Найбільший вплив має кількість вапна та співвідношення руда/концентрат.

На основі отриманих даних побудовано залежності індексу на удар від різних факторів.

Максимальна міцність досягається при 6,8 - 7% палива. При низькій основності (кількість вапна I-

15%) максимум індексу на удар 87.92%, при підвищенні вапна до 17,5 слідує незначне зниження максимуму до 87.69% при подальшому підвищенні вапна міцність зростає, досягаючи 90.23% (кількість вапна -25%).

Виходячи з оцінки даних рис 2 раціональним є значення вмісту палива 7%. При низькому вмісті кількості вапна (низькій основності) підвищення заміни концентрату рудою негативно впливає на характеристики міцності агломерату, міцність знижується з 88.58% до 86.98%. При кількості вапна

17,5% заміна рудою концентрату не робить істотного впливу на значення індексу на удар (ИНУ). Починаючи зі значення вмісту вапна - 20% спостерігається позитивний вплив підвищення ступеня заміни концентрату рудою.

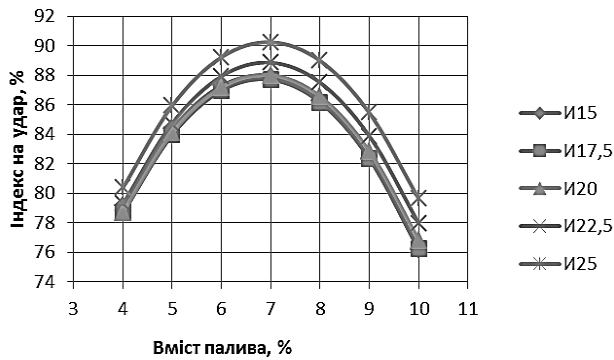


Рисунок 1 Залежність індексу на удар (ИНУ) від співвідношення руда:концентрат (P/K) та кількості вапняка (I) при кількості палива (T=7%)

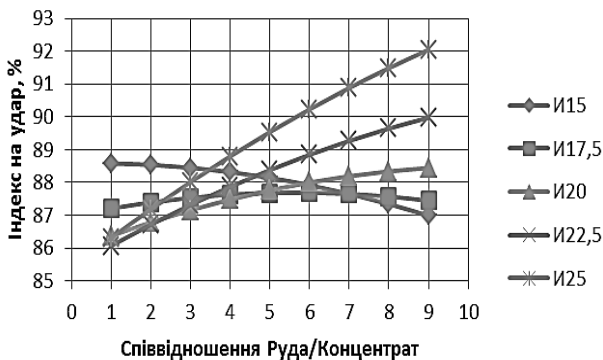


Рисунок 2. Залежність індексу на удар (ИНУ) від співвідношення руда/концентрат (P/K) та вмісту вапняка (I) при вмісті палива, % (T=7%)

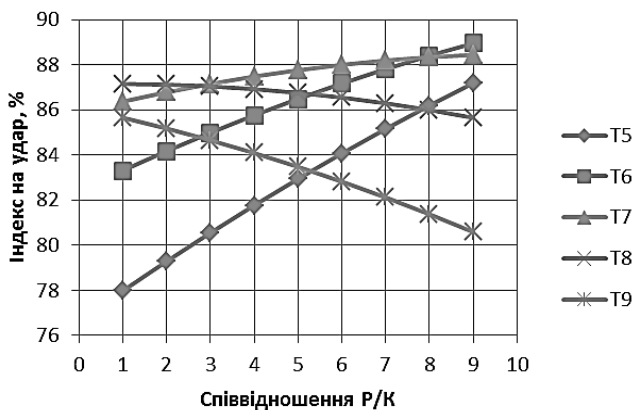


Рисунок 3 Залежність індексу на удар від співвідношення руда:концентрат і кількості палива при кількості вапняка (I=20%)

Для варіанту із середнім значенням вмісту вапняка, основність на рівні 1.6. При низькому вмісті палива спостерігаємо підвищення міцності агломерату при підвищенні заміни концентрату рудою з 77.98% до 87.19%. При вмісті палива 7-8% помітного впливу підвищення частки заміни рудою концентрату на міцність (ИНУ) не відзначено. При під-

вищенні вмісту палива вище 8% спостерігаємо негативний вплив заміни концентрату рудою.

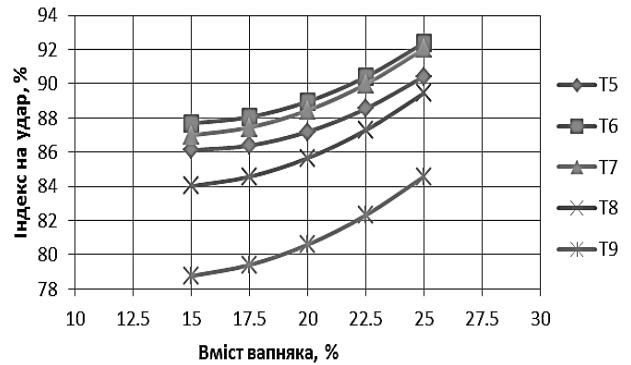


Рисунок 4 Залежність індексу на удар від кількості палива та вапняка при співвідношенні руда:концентрат (P/K=9)

Виходячи з даних рисунка 2, де ми спостерігаємо максимальну міцність при максимальній заміні концентрату рудою і максимальній основності, раціональним є співвідношення кількості руда/концентрат P/K, яке дорівнює 9. Міцність підвищується у всьому діапазоні вмісту вапняка. При низькому вмісті палива (5%) спостерігаємо підвищення міцності з 86.11% до 90.42%. При такому співвідношенні P/K (9:1 - максимальна заміна концентрату рудою) максимальна міцність 92.37% досягається при вмісті палива 6-7%. Подальше підвищення вмісту палива призводить до зниження міцності агломерату.

Таким чином комплекс одержаних даних по моделюванні впливу кількості вапняка (I), коксового дріб'язку (T), та співвідношення «руда/концентрат» (P/K) при постійному вмісті звороту та колошникового пилу показав: заміна концентрату на руду у вихідній аглошихті у співвідношенні P/K в інтервалі 4-9 для одержання агломерату основністю 1,6 досягається при вмісті палива 6-7%, вапняка 20-25%.

Експериментальні дослідження спікання дослідного агломерату

Дослідні спікання агломерату проводили в лабораторії кафедри. Для проведення досліджень по визначенню ефективності заміни частини концентрату залізною рудою родовища «СУХА БАЛКА» були використані такі шихтові матеріали: залізна руда, залізорудний концентрат, коксовий дріб'язок, вапняк, зворот. Шихта для кожного спікання розраховувалася на отримання агломерату основністю 1.6 од.

Спікання проводили в наступній послідовності. Агломераційну шихту попередньо зволожували до заданої вологості та огрудковували в лабораторному барабанному огрудковувачі. Виставляли розрідження під колосниковою решіткою на рівні 400 - 450 мм. вод. ст. Маса шихти для одного спікання становила 3 кг. Маса шихти, що завантажувалася в агломераційну чашу становила 2-2,2 кг (залишки – гарнісаж барабану окомковувачу). Далі протягом 1 хвилини проводили запалювання шихти продук-

тами спалювання суміші газу і повітря з температурою 1100°C. Під час спікання вели контроль температури газів, що відходять, розрідження під колосниковою решіткою та швидкості фільтрації. Величину показників фіксували кожної хвилини. Спікання завершували тоді, коли температура відхідних газів досягала максимуму, а потім починала знижуватися. На основі одержаних даних можливе прогнозування основних параметрів спікання дослідного агломерату. Отримання агломерату зада-

ної основності та властивостей здійснюється при крупності вапняку та твердого палива в межах 0-3мм, крупність залізорудного концентрату до 0,1 мм, залізна руда використовувалась без розсіву за фракціями, вологість шихти 7 - 8%, витрата твердого палива на процес 6 - 8%. Основні параметри спікання та досягнуті результати наведені у таблиці 5.

Аналіз результатів спікання показує, що значного впливу на міцність дослідного агломерату заміна концентрату рудою не має. Однак при співвідношенні руда/концентрат 9/1 збільшується час, при якому досягається максимальна температура газів що відходять, що може бути пов'язано зі змінням порізності шару шихти при використанні більш крупних частинок залізної руди. Це загалом сказалося і на величині питомої продуктивності процесу. В наведених експериментах висота шару шихти була в межах 290-300мм. Максимальне розрідження може бути рекомендоване на рівні 500-520 мм вод.ст.

Для уточнення отриманих показників необхідні подальші дослідження по визначенню характеру структурних складових дослідного агломерату при зміні складу вихідної шихти та інших технологічних параметрів процесу агломерації.

Обговорення результатів експериментальних спікань агломерату

У процесі агломерації стабільна структура спека створюється завдяки зовнішнім і внутрішнім джерелам теплоти, що визначають формування зв'язок між зернами і ступінь кристалізації агломерату. Як відзначено в роботах [13, 14] важливу роль в процесі зміцнення спека грають реакції в твердих фазах, продукти яких визначають розвиток рідкофазного спікання, кінцевий мінералогічний склад агломерату і його металургійні властивості. Аналіз ймовірних твердо фазових з'єднань показує, що вони утво-

Таблиця 5 Результати лабораторних спікань дослідних агломератів при заміні частини концентрату залізною рудою родовища «Суша балка»

Співвідношення Руда/Концентрат	Час процесу, хв	Час початку зростання температури газів, що відходять, хв	T _{макс} , °C газів що відходять	Початкове розрідження, мм вод.ст.	Розрідження, мм вод.ст.	Питома продуктивність, кг/(м ² ·ч)	Значення індексу на удар, %	Вміст коксу, %	Витрата вапняку, %
3	12,5	8	545	440	550	1,136	86,5	7	25
3	14	11	525	400	450	1,2284	91,5	7	15
3	13	9,5	510	420	500	1,2172	87	8	20
3	14,5	11	495	420	480	1,0831	85,5	6	20
6	16	11,5	360	380	470	0,892	91	8	25
6	13	10	525	350	400	1,2035	90,5	6	25
6	14	9,5	410	400	470	1,0535	85	8	15
6	14,5	9,5	370	420	470	1,0625	85,5	6	15
6	15	10,5	350	370	420	0,971	88	7	20
9	15,5	11,5	380	300	420	1,1095	90,5	7	25
9	15,5	11,5	365	450	550	1,0363	89	7	15
9	13,5	10,5	425	450	520	1,1279	84,5	8	20
9	16	12	420	470	520	1,002	89	6	20

рюються в результаті реакцій між залізовмісними оксидами і порожньою породою матеріалів, що спікаються.

Число контактів між цими оксидами, є найбільш істотним фактором, що визначає вихід продукту в результаті реакцій у твердій фазі. Найбільш важливими компонентами, які беруть участь у формуванні структури агломерату є: CaO, MgO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Fe₃O₄, MnO і мінерали, які утворюються на базі цих компонентів. Реакції в твердих фазах при агломерації відбуваються в зоні підігріву шихти. Завдяки швидкому підйому температури в цій зоні тривалість твердо фазної взаємодії мала. Кількість твердо фазного продукту визначається площею контакту цих компонентів. Хімічна спорідненість реагуючих речовин в даному випадку є необхідною умовою. Так, наприклад, при спіканні гематитових руд фаяліт може бути отриманий тільки в відновлювальній атмосфері після відновлення гематиту, оскільки гематит в окислювальній атмосфері не реагує з кремнеземом. В складній системі агломераційної шихти можуть відбуватись реакції з утворенням силікатів кальцію, феритів кальцію силікатів заліза, залізо кальцієвих олівінів.

Авторами [14] виконані термодинамічні розрахунки та встановлено, що з розглянутих реакцій, які можуть протікати в суміші шихтових матеріалів, найбільш вірогідною є реакція утворення однокальцієвого фериту і двухкальцієвого силікату. Утворення в твердій фазі залізикальцієвих олівінів і фаяліта малоймовірно.

Ці відомості визвали інтерес при розгляді фазових складових, які утворюються при формуванні агломерату. Нами під час виконання роботи оцінку якості та металургійних властивостей агломерату здійснювали на основі результатів аналізу зразків агломерату, який відбирали по висоті шарів утвореного спеку. Виходячи з одержаних даних, вміст CaO, SiO₂ зростає при збільшенні відстані від поверхні спеку. Вигорання вуглецю коксу при просуванні зони спікання донизу збільшує кількість порожньої породи, яка містить ці оксиди і які розчиняються в утвореному розплаві при його русі вниз спеченого матеріалу. CaO утворює легкоплавкі з'єднання з SiO₂, MgO та Fe₂O₃ за рахунок чого виникає агломераційний розплав, що зумовлює залежність вмісту цих компонентів від вмісту CaO. Для вмісту сірки та фосфору існує тісний зв'язок зі вмістом CaO та FeO, що відповідає загально прийнятним відомостям по термодинамічним залежностям процесу знесірчення.

Аналіз показав, що для високо основного агломерату характерною є значна неоднорідність мінералогічного складу в блоках спеченого агломерату при досить однорідному хімічному складі. Треба відмітити, що на процес мінералоутворення крім складу агломераційної шихти впливає газодинаміка шару, що спікається. Цим може бути обумовлено утворення неоднорідності мінералогічного складу в блоках агломерату, на що звертали увагу автори [15].

Слід відзначити, вплив основності розглядався [15] при освоєнні технології виробництва високоосновного агломерату для умов ЧМК. Автори показали, що при збільшенні основності досягається збільшення холодної міцності за рахунок значного зменшення в агломераті кількості крихкого скла, утворення ферито-кальцієвої зв'язки з кальцієвих олівінів. Зростання CaO у складі агломерату сприяє перетворенню двухкальцієвого силікату у трьох кальцієвий силікат, який не має фазових перетворень зі збільшенням об'єму і не приводить до руйнування агломерату. Основною мінеральною фазою агломерату є ферити кальцію, яку виконують функцію зв'язки, що забезпечує високу механічну міцність. При підвищенні основності зменшується кількість одно кальцієвих і збільшується кількість двухкальцієвих феритів. Збільшення кількості коксу в шихті приводить до підвищення теплового рівня у спікаемому шарі, що підвищує швидкість перетворення Fe₂O₃ до Fe₃O₄ та далі до FeO. Однак в дійсності у процесі спікання вміст FeO та Fe₂O₃ при збільшенні основності зменшується за рахунок взаємодії оксидів з оксидами кальцію. В роботі [16] автори допускають виникнення в окремих мікрооб'ємах глобулярних виділень металевого заліза, яке може утворитись при значному підвищенні основності агломерату.

З іншого боку, підвищення основності агломерату зменшує кількість FeO та Fe₂O₃. З цим пов'язано зниження витрати коксу на процес. Це обумовлено деяким зниженням температурного рівня процесу спікання за рахунок підвищення швидкості процесу мінералоутворення, що є характерним для спікання високо основних агломераційних шихт [10, 17]. З іншого боку, зниження температурного рівня процесу привело до зменшення вмісту FeO в агломераті в середньому на 1,3%.

Важливим фактором забезпечення високої механічної міцності готового агломерату є степінь кристалізації зв'язки. Кількість скла зменшується в нижніх шарах спеченого агломерату в порівнянні з верхніми шарами (71,8-96,2%). Степінь кристалізації зв'язки пов'язана зі швидкістю охолодження агломераційного спеку при фільтрації повітря: швидкість у верхньому шарі завжди вища ніж у нижніх шарах.

Механічну міцність агломерату у холодному стані визначали по виходу дрібниці фракції 0-5 мм при випробуванні в барабані. Високоосновний агломерат має високу холодну міцність у порівнянні з агломератом меншої основності. Агломерат з нижньої частини спеченого агломерату має значно вищу механічну міцність, ніж агломерат з верхньої частини спеченого агломерату. Тісний зв'язок та визначальний вплив на механічну міцність має степінь кристалізації зв'язки. Одержані дають характеристику холодної міцності агломерату, яку він має при перевантаженнях, транспортуванні. Важливе значення має механічна міцність агломерату при завантаженні у доменну піч при нагріві та при відновленні – гаряча міцність.

Стосовно до офлюсовані агломерату експериментально встановлено негативний вплив присутності гематиту і скла на його гарячу міцність. Гематит при нагріванні в відновлювальній атмосфері змінює питомий об'єм, збільшуючи внутрішню напругу, і руйнується внаслідок анізотропії відновлення. Скло зберігає крихкість аж до 600-700 °С, коли стає пластичним і релаксує напруги. Таким чином, присутність скла шкідливо позначається не тільки на холодній, але і на гарячій міцності агломерату. Вплив інших факторів на гарячу міцність досліджено поки недостатньо. Є дані про те, що масивні литі структури агломерату, отриманого при підвищеній витраті твердого палива, що забезпечують високу холодну міцність, не дають високої гарячої міцності. У ФРН, Швеції, Японії віддають перевагу пористим малооплавленим агломератам, структура яких допускає хоча б мінімальні взаємні переміщення структурних складових під дією внутрішніх напружень. Досліди показали, що такі агломерати з 5-10% FeO володіють так званої гнучкою структурою, яка обумовлює підвищену гарячу міцність. Підвищення гарячої міцності агломерату є предметом досліджень у багатьох країнах світу. Відновлюваність агломерату, як це було показано в дослідженні К. К. Шкодіна, пов'язана в основному з поверхнею пір, доступних газу-відновника. У невеликому ступені на відновлюваність впливає і мінералогічний склад агломерату. Зокрема, відновити події знижується, якщо в агломераті присутні важковідновні фази: фаяліт Fe_2SiO_4 , Са-олівін, браунміллер $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ і скло. Відновлюваність офлюсованого агломерату змінюється зі збільшенням основності по екстремальній залежності. Максимум відновлюваності відноситься до агломерату основності $CaO + SiO_2 = 1,4-1,5$. Як показав досвід, відновлення офлюсованого агломерату в даний час відповідає сучасним вимогам доменної технології. Температура початку розм'якшення в відновлювальній атмосфері агломератів основністю 0,5-0,7 і 2-4 становить відповідно 1100-1150, 1050-1100 і 1200-1250 °С. Мінімальна температура початку розм'якшення відповідає максимальній кількості скла в агломераті основністю 0,5-0,7, так як скло, яке не має фіксованої точки плавлення, розм'якшується в широкому інтервалі температур.

В роботі [18] автори висловлюють думку про те, що на їх погляд традиційні способи вдосконалення технології доменної плавки - зниження витрати коксу і підвищення продуктивності - в значній мірі вичерпані. У їх числі найбільш значущі: вміст заліза в шихті, використання добавок до дуття (природний газ), нагрівання дуття в повітронагрівачах і ін. Найбільш перспективним способом, на погляд авторів, є підвищення якості залізорудної сировини і коксу. Важливим моментом в удосконаленні технології доменної плавки є використання математичного моделювання доменного процесу, яке дозволяє вивчати вихідні параметри доменної плавки (витрата коксу; продуктивність; ступінь використання

відновного потенціалу газу; температурні поля шихти і газу, в тому числі тривимірні лінії рівних ступенів відновлення) при зміні вхідних параметрів (параметри дуття; параметри шихти, включаючи розподіл по радіусу і окружності; профіль печі та ін.) без промислових випробувань. Автори пропонують використання наступний підхід до вирішення практичних завдань: лабораторні дослідження на експериментальних установках з визначенням якісних характеристик залізорудної сировини і коксу, аналітичне дослідження за допомогою математичних моделей, дослідно-промислові та промислові випробування. В цій роботі [18] для вивчення впливу на ефективність доменної плавки обрано такі показники якості - відновлюваність і механічна міцність агломерату.

Як показано в [9], відновлюваність агломерату визначається мінералогічним складом, структурою і пористістю огрудкованих матеріалів. Ці фактори в свою чергу залежать від основності агломерату, яка також впливає на його відновлюваність, причому цей вплив має складний характер. При переході від неофлюсованого агломерату до офлюсованого до основності $CaO/SiO_2 = 1,2-1,6$ відновлюваність істотно поліпшується; з ростом основності вона знижується, потім знову зростає. Пористість матеріалів в значній мірі визначає його відновлюваність. Пористість промислових агломератів змінюється в залежності від різних факторів від 25 до 45% при широкому діапазоні розмірів пор [19].

У процесі агломерації стабільна структура спека створюється завдяки зовнішнім і внутрішнім джерелам теплоти, що визначає формування зв'язок між зернами і ступінь кристалізації агломерату. Важливу роль в процесі зміцнення спека грають реакції в твердих фазах, продукти яких визначають розвиток рідкофазного спікання, кінцевий мінералогічний склад агломерату і його металургійні властивості. Аналіз ймовірних твердофазових з'єднань показує, що вони утворюються в результаті реакцій між залізозмісними оксидами і порожньою породою матеріалів, що спікаються. Число контактів між цими оксидами, є найбільш істотним фактором, що визначає вихід продукту в результаті реакцій у твердій фазі. Найбільш важливими компонентами, які беруть участь у формуванні структури агломерату є: CaO , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , MnO і мінерали, які утворюються на базі цих компонентів. Реакції в твердих фазах при агломерації відбуваються в зоні підігріву шихти. Завдяки швидкому підйому температури в цій зоні тривалість твердо фазної взаємодії мала. Кількість твердофазного продукту визначається площею контакту цих компонентів. Хімічна спорідненість реагуючих речовин в даному випадку є необхідною умовою. Так, наприклад, при спіканні гематитових руд фаяліт може бути отриманий тільки в відновлювальній атмосфері після відновлення гематиту, оскільки гематит в окислювальній атмосфері не реагує з кремнеземом. Термодинамічний підхід має особливе значення в складних системах при агломера-

ції, коли інтенсифікація процесу і якість агломерату залежать від первинного твердофазного з'єднання з низькою температурою плавлення, що забезпечує перехід в рідкофазне спікання.

З розглянутих реакцій, які можуть протікати в суміші шихтових матеріалів, найбільш вірогідною є

реакція утворення однокальцієвого фериту і двухкальцієвого силікату.

Мінералогічний склад офлюсованих криворізьких агломератів (по Е.Вегману)

Основність	Витрата вуглецю	Мінералогічний склад, %					
		Магнетит і юстит	Гематит	Кварц	Залізо кальцієві олівіни та скло	Силікати	Ферити кальцію
1,26	5	53,33	11	10,5	14,8	5,37	сліди
1,29	17	67,73	4,1	1,21	21,02	5,84	сліди
1,36	8	62,51	1,1	0,22	7,5	23,6	3,75
1,56	4	48,14	27,23	6,05	4,75	11,22	2,61
1,64	4	47,2	24,53	5,9	5,0	9,48	7,80
2,13	8	44,23	0,12	-	3,14	29,83	11,08

Мінералогічний склад офлюсованих агломератів наведено в таблиці. При змінненні основності характерним є виділення силікатів кальцію серед олівінів в якості окремої фази. Вапно, що введено в шихту утворює значну кількість силікатів кальцію, тому починається кристалізація двухкальцієвого силікату у вигляді окремої фази. Тому кількість силікатів кальцію зростає, а кількість залізо кальцієвих олівінів зменшується. Для високо основних агломератів характерним є наявність трьох кальцієвого силікату. Заміна двухкальцієвого силікату, який не схильний до фазового перетворення, позитивно впливає на міцність агломерату.

Методами петрографічного аналізу визначали за допомогою оптичного мікроскопу Neophot-21 у

відбитому світлі фазовий склад дослідного агломерату, одержаного при заміні залізородного концентрату залізною рудою. Для аналізу були відібрані з зразка агломератів, одержаних з заміною залізородного концентрату залізною рудою від мінімальної заміни до максимальної. Введення у склад агломераційної шихти 30% залізної руди не змінило характеристику міцності агломерату (рисунк 5). Однак у мікроструктурі склофази з'явилися дрібні кристали феритної фази, які утворилися при охолодженні залізо силікатного розплаву. Міцність агломерату забезпечувала скло фаза, яка була армована голчатими кристалами фериту.



Рисунок 5. Мікроструктура офлюсованого агломерату при заміні 30% концентрату залізною рудою. Магнетит – біле, скло фаза – сіра, голчаті кристали ферита – світло-сірі. Відбите світло, x500

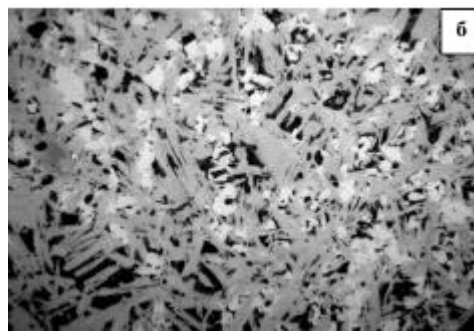
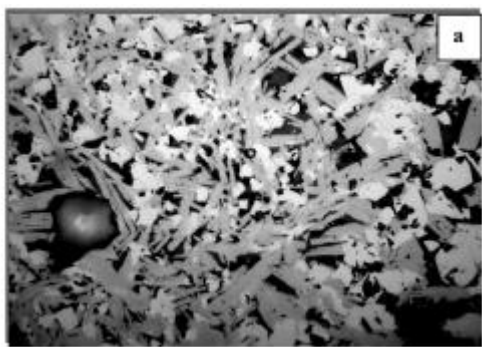


Рисунок 6. Мікроструктура офлюсованого агломерату при заміні 60% концентрату залізною рудою (а), при заміні 90% концентрату рудою (б). Магнетит – біле, скло фаза – сіра, голчаті кристали ферита – світло-сірі. Відбите світло, x500

Збільшення у складі аглошихти заміни концентрату рудою помітно змінювало мінералоутворення агломерату. Макроструктура складалась з магнетиту, фериту та незначної кількості скло фази. Пластинчасті кристали фериту контактували з магнетитом та ставали основною зв'язкою рудних зерен. Кількість залишкового розплаву у вигляді скло фази проявлялась біля феритних кристалів.

У дослідному офлюсованому агломераті основною фазовою складовою є магнетит, в наявності ферити кальцію та силікати кальцію. Виділення магнетиту спостерігаються у вигляд зерен, які мають форму багатогранників або скелетних виділень у скло фазі (рисунок 6а). Силікатна зв'язка утворюється у вигляді залізного скла та має невелику кількість кальцієвих силікатів. При підвищенні основності до 1.6 в структурі агломерату з'являються ферити кальцію, які знаходяться між зернами магнетиту. Зростання міцності агломератів здійснюється за рахунок заміни в їх складі силікатних зв'язок на феритні (рисунок 6б).

Можливим поясненням встановленого позитивного впливу заміни концентрату залізною рудою може бути пов'язано з хімічним складом залізної руди родовища «СУХА БАЛКА», яка містить оксид алюмінію та оксид магнію. Оксид алюмінію сприяє утворенню алюмосилікофериту. Кількість магнетиту зменшувалась, оскільки він витрачався на утворення алюмосилікофериту. Крім того, при кристалізації магній входить в ґратки двухальцєвого силікату та запобігає поліморфному перетворенню $\beta 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow \gamma 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, що впливає на міцність агломерату.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто загальні закономірності і механізм процесу агломерації залізної руди з урахуванням перетворень, що протікають при спіканні і за участю компонентів гетерогенних систем. Виходячи літературних даних, зміна основності агломерату призводить до різкої зміни його мінералогічного складу - підвищується масова частка феритів ($\text{CaO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) і силікатів кальцію ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) знижується частка гематиту, магнетиту і вюстита. Силікати кальцію починають утворюватися при основності агломерату близько 0,5, потім їх вміст безперервно зрос-

тає до 20-30% в залежності від складу порожньої породи. Ферити кальцію починають з'являтися при основності агломерату близько 1,5

2. У дослідному агломераті основною фазовою складовою є магнетит, в наявності ферити кальцію та силікати кальцію. Силікатна зв'язка утворюється у вигляді залізного скла та має невелику кількість кальцієвих силікатів. При підвищенні основності до 1.6 в структурі агломерату з'являються ферити кальцію, які знаходяться між зернами магнетиту. Зростання міцності агломератів здійснюється за рахунок заміни в їх складі силікатних зв'язок на феритні.

3. Отримання агломерату заданої основності та властивостей здійснюється при крупності вапняку та твердого палива в межах 0-3мм, крупність залізородного концентрату до 0,1 мм, залізна руда використовувалась без розсіву за фракціями, вологість шихти 7 - 8%, витрата твердого палива на процес 6 - 8%.

4. Аналіз результатів спікання показує, що значного впливу на міцність дослідного агломерату заміна концентрату рудою не має. Однак при співвідношенні руда/концентрат 9/1 збільшується час при якому досягається максимальна температура газів що відходять, що може бути пов'язано зі змінням порізності шару шихти при використанні більш крупних частинок залізної руди. Це загалом сказалося і на величині питомої продуктивності процесу. В наведених експериментах висота шару шихти була в межах 290-300мм. Максимальне розрідження може бути рекомендоване на рівні 500-520 мм вод.ст.

5. Можливим поясненням встановленого позитивного впливу заміни концентрату залізною рудою може бути пов'язано з хімічним складом залізної руди родовища «СУХА БАЛКА», яка містить оксид алюмінію та оксид магнію. Оксид алюмінію сприяє утворенню алюмосилікофериту кальцію. Кількість магнетиту зменшувалась, оскільки він витрачався на утворення алюмосилікофериту кальцію. Крім того, при кристалізації магній входить в ґратки двухальцєвого силікату та запобігає поліморфному перетворенню $\beta 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \rightarrow \gamma 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, що впливає на міцність агломерату.

Бібліографічний опис

1. Influence of beneficiated sinter grade iron ore fines size on sinter productivity and quality. Umadevi Tekkalakote, Brahmacharyulu Angalakuditi, Rameshwar sah, Marutiram Kaza and Pradipta chandra Mahapatra. Metall. Res. Technol. Volume 114, Number 1, 2017. 105. Number of page(s) 12. DOI <https://doi.org/10.1051/metal/20160501>.

2. A. Kumasaka, K. Kondo, N. Sakamoto, O. Komatsu, H. Noda and M. Shimiz. Granulation characteristics of iron ore fines for hybrid pelletized sinter process. Caractéristiques des fines de minerai de fer dans le procédé HPS. Rev. Met. Paris. Volume 89, Number 3, Mars 1992. P. 225 – 232.

DOI <https://doi.org/10.1051/metal/1992890302252>.

3. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железородных материалов. – М.: Металлургия, 1996, с. 150.

4. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. – М: Металлургия, 1967, с. 368.

5. Сигов А.А., Шурхал В.А. Агломерационный процесс.-Киев: Техника, 1969

6. Ефименко Г.Г., Ковалев Д.А. Процессы смачивания при спекании железных руд и концентратов// Изв. АН СССР. Металлы.-1965.-№1.-с. 11-17
 7. http://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shifr.rdf&schifr=65040
 8. http://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shifr.rdf&schifr=66143
 9. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. - Екатеринбург: 2001. - 634 с. ISBN 5-7691-1235-2.
 10. Металлургия чугуна. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Ю.С. Юсфин и др.–3-изд., переработанное и дополненное. -М.: ИКЦ «Академкнига», 2004 -774 с.
 11. Якубцинер Н.М., Смирнов Ю.П., Шоленинов В.М. Оптимальная крупность компонентов агломерационной шихты при спекании мелких концентратов./ Труды Ленинградского политехнического института. Изд-во Metallurgia.-1964.-е. 168.
 12. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации. М.: Metallurgia, 1974. –288 с.
 13. Е.В. Братковский, А.В. Заводяный. Расчет состава шихты, материального и теплового балансов агломерационного процесса. Методическое пособие. Новотроицк. НфМИСиС, 2006. – 34 с.
 14. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента: монография / В. Н. Ковшов. - Киев Донецк: Вища шк., 1982. 120с.
 15. Теоретические основы производства окускованного сырья. Ковалев Д.А., Ванюкова Н.Д., Иващенко В.П., Крикунов Б.П., Ягольник М.В., Бойко М.Н. Днепрпетровск, ИМА-пресс.-2011.476 с.
 16. Исследование влияния процессов активации твердофазовых реакций на качество продукта и производительность при окусковании железорудных офлюсованных шихт. Д.А.Ковалев, А.В.Бабенко, Н.Д.Ванюкова, М.В.Ягольник. Сучасні проблеми металургії – 2006, том 9. С.53-64
 17. Освоение производства высокоосновного доменного агломерата на Череповецком металлургическом комбинате. А.Н.Пыриков, В.П.Невраев, А.Р.Жак, В.А.Хаустов./Сталь№8,1989, с.4-7.
 18. Исследование свойств агломерата с различной основностью. А.И.Иванов., Л.В. Самойленко, О.Н.Горова, А.Г.Найдовский и др. Известия Вузов. Черная металлургия. №1, 1988. С.7-10.
 19. Утков В.А. Высокоосновной агломерат. – М.:Metallurgia. 1974.- 156с.
 20. Витькина Г. Ю. Исследование влияния металлургических характеристик железорудного сырья и кокса на эффективность доменной плавки / Г. Ю. Витькина, А. Н. Дмитриев, Ю. А. Чесноков // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сборник докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2013) с международным участием (Екатеринбург, 28–29 марта 2013 г.). — Екатеринбург : УрФУ, 2013. — С. 28-34.
 21. Плотников В.В., Ситгареев Л.В. Інтенсифікація агломераційного процесу за рахунок вдосконалення технології комбінованого огрудкування і завантаження шихти. Вісник ПГТУ. Вип 25. 2018С.41-46.

Reference

1. Influence of beneficiated sinter grade iron ore fines size on sinter productivity and quality. Umadevi Tekkalakote, Brahmacharyulu Angalakuditi, Rameshwar sah, Marutiram Kaza and Pradipta chandra Mahapatra. Metall. Res. Technol. Volume 114, Number 1, 2017. 105. Number of page(s) 12. DOI <https://doi.org/10.1051/metal/20160501>.
2. A. Kumasaka, K. Kondo, N. Sakamoto, O. Komatsu, H. Noda and M. Shimiz . Granulation characteristics of iron ore fines for hybrid pelletized sinter process. Caracteristiques des fines de minerai de fer dans le procede HPS. Rev. Met. Paris. Volume 89, Number 3, Mars 1992. P. 225 – 232. DOI <https://doi.org/10.1051/metal/1992890302252>.
3. Korotich V.I. Teoreticheskie osnovy okomkovaniya zhelezorudnyh materialov. – М.: Metallurgiya, 1996, s. 150.
4. Bazilevich S.V., Vegman E.F. Aglomeraciya. – М: Metallurgiya, 1967, s. 368.
5. Sigov A.A., Shurhal V.A. Aglomeracionnyj process.-Kiev: Tehnika, 1969
6. Efimenko G.G., Kovalev D.A. Processy smachivaniya pri spekanii zheleznyh rud i koncentratov// Izv. AN SSSR. Metall. -1965.-№1.-с. 11-17
 7. http://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shifr.rdf&schifr=65040
 8. http://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shifr.rdf&schifr=66143
 9. Puzanov V.P., Kobelev V.A. Strukturnoobrazovanie iz melkih materialov s uchastiem zhidkih faz. - Ekaterinburg: 2001. - 634 s. ISBN 5-7691-1235-2.
 10. Metallurgiya chuguna. Vegman E.F., Zherebin B.N., Pohvisnev A.N., Yu.S. Yusfin i dr.–3-izd., pererabotannoe i dopolnennoe. -М.: ИКЦ «Академкнига», 2004 -774 с.
 11. Yakubciner N.M., Smirnov Yu.P., Sholeninov V.M. Optimalnaya krupnost komponentov aglomeracionnoj shihty pri spekanii melkih koncentratov./ Trudy Leningradskogo politehnicheskogo instituta. Izd-vo Metallurgiya.-1964.-е. 168.
 12. Vegman E.F. Teoriya i tehnologiya aglomeracii. М.: Metallurgiya, 1974. –288 с.
 13. E.V. Bratkovskij, A.V. Zavodyanyj. Raschet sostava shihty, materialnogo i teplovogo balansov aglomeracionnogo processa. Metodicheskoe posobie. Novotroick. NfMISiS, 2006. – 34 с.

14. Kovshov V.N. Postanovka inzhenerenogo eksperimenta: monografiya / V. N. Kovshov. - Kiev Doneck: Visha shk., 1982. 120s.
15. Teoreticheskie osnovy proizvodstva okuskovannogo syrya. Kovalev D.A., Vanyukova N.D., Ivashenko V.P., Krikunov B.P., Yagolnik M.V., Bojko M.N. Dnepropetrovsk, IMA-press.-2011. 476 s.
16. Issledovanie vliyaniya processov aktivacii tverdogazovykh reakcij na kachestvo produkta i proizvoditelnost pri okuskovanii zhelezorudnykh oflyusovannykh shiht. D.A.Kovalev, A.V.Babenko, N.D.Vanyukova, M.V.Yagolnik. Suchasni problemi metalurgiyi – 2006, tom 9. S.53-64
17. Osvoenie proizvodstva visokoosnovnogo domennogo aglomerata na Cherepoveckom metallurgicheskom kombinat. A.N.Pyrikov, V.P.Nevraev, A.R.Zhak, V.A.Haustov./Stal№8,1989, s.4-7.
18. Issledovanie svojstv aglomerata s razlichnoj osnovnostyu. A.I.Ivanov., L.V. Samojlenko, O.N.Gorovaya, A.G.Najdovskij i dr. Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya. №1, 1988. S.7-10.
19. Utkov V.A. Vysokoosnovnoj aglomerat. – M.:Metallurgiya. 1974.- 156s.
20. Vitkina G. Yu. Issledovanie vliyaniya metallurgicheskikh harakteristik zhelezorudnogo syrya i koksa na effektivnost domennoj plavki / G. Yu. Vitkina, A. N. Dmitriev, Yu. A. Chesnokov // Teplotehnika i inforatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve : sbornik dokladov II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchyonykh (TIM'2013) s mezhdunarodnym uchastiem (Ekaterinburg, 28–29 marta 2013 g.). — Ekaterinburg : UrFU, 2013. — S. 28-34.
21. Plotnikov V.V., Saitgareyev L.V. Intensifikaciya aglomeracijnogo procesu za rahunok vdoskonalennya tehnologiyi kombinovanogo ogrudkuvannya i zavantazhennya shiht. Visnik PGTU. Vip 25. 2018S.41-46.

Стаття поступила 1.11.2018