

УДК 669.66-936.46:963

<https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.02>

Бабенко О.В., Варицев А.С., Мирошніченко Є.Ю., Кучеренко А.С., Лагун В. М.

Виробництво безопалювального вуглецьмісного залізофлюсу з**використанням шламів конвертерного виробництва**

Babenko O., Varytsev A.S., Myroshnychenko E., Kucherenko A., Lagun V.

Production of unheated carbon-containing iron flux using converter production sludge

Розширити ресурсну базу залізрудних компонентів можливо залученням у переробку залізовмісних відходів: доменні і сталеплавильні шлаки і шлами, прокатна окалина, колошниковий пил, коксовий дріб'язок, відсівання феросплавів, шлами, що містять марганець і тонкі концентрати - у металургії; вугільні шлами і штаби - у вугільній промисловості; чавунна, сталева, алюмінієва й інша стружка - у машинобудуванні.

По вмісту цінних компонентів відходи конкурентоздатні з первинною сировиною і можуть бути повторно використані у виробничих процесах.

Мета роботи: дослідження можливості використання відходів металургійних виробництв у процесі виробництва обкотишів.

Завдання роботи – дослідження впливу вмісту вапна, цементу і твердого палива на металургійні властивості обкотишів, до складу яких, окрім концентрату та зв'язуючих, входять відходи металургійних виробництв.

Методика дослідження - для поліноміального опису процесу отримання безопалювального вуглецьмісного залізофлюсу використано трьох факторний план Бокса - Бенкіна (центральне композиційне ортогональне планування другого порядку для трьох факторного експерименту). Фактори варіювання - вміст вапна, вміст цементу, вміст твердого палива.

Ключові слова: обкотиші, цемент, залізофлюс, поліноміальний опис.

It is possible to expand the resource base of iron ore components by involving in the processing of iron-containing waste: blast furnace and steelmaking slags and slurries, rolling slag, furnace dust, coke fines, screening of ferroalloys, slurries containing manganese and fine concentrates - in metallurgy; coal slurries and staffs - in the coal industry; cast iron, steel, aluminum and other shavings - in machine building.

In terms of the content of valuable components, waste is competitive with primary raw materials and can be reused in production processes.

The purpose of the work: the study of the possibility of using metallurgical waste in the process of production of coils.

The task of the work is to study the influence of the content of lime, cement and solid fuel on the metallurgical properties of billets, the composition of which, in addition to concentrate and binders, includes waste from metallurgical industries.

Research methodology - for the polynomial description of the process of obtaining unheated carbon-containing iron flux, a three-factor Box-Benkin plan (central composite orthogonal planning of the second order for a three-factor experiment) was used. Variation factors - lime content, cement content, solid fuel content.

Key words: pellets, cement, iron flux, polynomial description.

Вступ. В Україні щорічно утвориться близько 1 млрд. т техногенних відходів, з яких тільки 10-15% використовуються як вторинні ресурси, а інші надходять у різні сховища. До них відносяться відходи чорної металургії, вугільної промисловості, машинобудування, що містять залізо та вуглець.

Ринкові умови господарювання, коли до 98,2% інвестицій в основний капітал, спрямованих на охорону навколишнього середовища, здійснюються за рахунок власних коштів підприємств, у максимальному ступені стимулюють розробку найбільш ефективних природоохоронних технічних і технологічних рішень виробництва залізрудної сировини, коксу і чавуну.

Розширити ресурсну базу залізрудних компонентів можливо залученням у переробку залізовмісних відходів: доменні і сталеплавильні шлаки і шлами, прокатна окалина, колошниковий пил, коксовий дріб'язок, відсівання феросплавів, шлами, що містять марганець і тонкі концентрати - у металургії; вугільні шлами і штаби - у вугільній промис-

ловості; чавунна, сталева, алюмінієва й інша стружка - у машинобудуванні.

По вмісту цінних компонентів відходи конкурентоздатні з первинною сировиною і можуть бути повторно використані у виробничих процесах.

Особливості процесу огрудкування при виробництві обкотишів.

Механізм процесу огрудкування при виробництві обкотишів залишається тим же що і при огрудкуванні агломераційних шихт: формування грудки здійснюється шляхом послідовного накопчування дрібних часточок матеріалу на зародок. Однак на відміну від агломерації (де роль зародків виконують шматочки чи повернення руди) зародки обкотишів утворюються з тих же дрібних часточок комкученого матеріалу, що і поверхневі шари. Інша відмінність від огрудкування при агломерації полягає в тім, що окатиші повинні бути значно великих розмірів (15...20мм). Це значно збільшує час огрудкування (з 1...2 хв при агломерації до 8...10 хв). Окатиші повинні мати досить високу міцність

Бабенко Олександр Вікторович – к.т.н., доц., УДУНТ,
Варицев Антон Сергійович – аспірант УДУНТ,
Мирошніченко Єгор Юрійович – аспірант УДУНТ,
Кучеренко Олександр Сергійович – аспірант УДУНТ,
Лагун Віктор Михайлович - Директор Дніпровський індустріальний фаховий коледж.

Babenko O. – c.t.s., USUST
Varytsev A. – postgraduate USUST
Myroshnychenko E. – postgraduate USUST
Kucherenko A. – postgraduate USUST
Lagun Viktor - Director of the Dnipro Industrial Vocational College.

(20...30 Н/обкотиш). До комкуємому матеріалу в цьому зв'язку пред'являються визначені вимоги гранулометричного складу. Експериментами і практикою встановлено, що успішно комкуватися можуть залізородні концентрати, крупність часток яких не перевищує 0,07 мм.

З метою поліпшення ходу огрудкування й одержання міцних обкотишів навіть до того дрібного концентрату завжди додають невелику кількість (0,5...1,0 %) бентоніту, головною особливістю якого є дуже велика питома поверхня – до $8 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{м}$. Під дією розпираючого ефекту молекул води бентоніт розпадається на дрібні часточки, що сильно гидратуються, завдяки чому обсяг бентоніту зростає в багато разів. Заповнюючи простір між рудними часточками, коллоїдизований бентоніт істотно підвищує зчеплення в обсязі концентрату.

Процес одержання сирих обкотишів у грануляторі складається з трьох етапів: утворення зародків, ріст грудок, масообмін між окатишами, що утворилися. Первинні грудочки – зародки утворюються або в результаті влучення краплі води в обсяг сухого матеріалу, або шляхом руйнування шару концентрату після вакуум – фільтрів. Такі грудочки відповідають необхідним вимогам і з успіхом виконують роль зародкових центрів. Поперше, вони складені з дрібних часток бентоніту і дрібних часточок залізородних концентратів і скріплені молекулярними силами грудочки мають достатню міцність і витримують без руйнування динамічні навантаження в окомковувачі. По-друге, маючи розмір 9...12 мм і масу 1...2 грами, такі грудочки при русі в грануляторі здобувають кінетичну енергію, достатню для руйнування комірчастих агрегатів із дрібних часток і для здійснення перебування своєї внутрішньої структури. По-третє, вони є перезволоженими, грудочки мають високу пластичність. Ця обставина грає особливо важливу роль для успішного плину процесу формування обкотишів. Численними дослідженнями встановлено, що при заповненні всіх пір зразка сипучого матеріалу водою часточки, оточені гидратними оболонками, володіють щодо високою свободою взаємного переміщення, завдяки чому полегшується одержання найбільш щільного упакування і відповідне підвищення міцності.

Друга стадія формування окатиша – його ріст, здійснюється в результаті багаторазових ударів об нерухомий шар матеріалу при скочуванні в грануляторі. Під дією динамічних навантажень грудочка ущільнюється – окремі часточки в результаті взаємного переміщення укладаються більш щільно. При цьому надлишкова волога видавлюється на поверхню грудочки, завдяки чому стає можливим подальше приєднання до такої грудки все нових і нових часточок. Якщо всі пори в матеріалі заповнені водою (двухфазна система), то капілярні сили зникають і міцність обумовлена тільки молекулярними силами. Зчеплення окремих часточок здійснюється своєрідним “клейовим мостом” часточок, що утворюється завдяки наявності між поверхня-

ми, адсорбованих водяних плівок. Адгезія молекул води виникає в результаті силового поверхневого поля часточки, а когезія (зчеплення орієнтованих молекул води) – результат водневих зв'язків. У тих обсягах, де в порах залишилося повітря, зчеплення визначають капілярні сили.

При даному режимі роботи гранулятора є визначена мінімальна товщина водяних плівок усередині грудки, що відповідає величині динамічних навантажень. Як тільки цей боковий вівтар буде досягнуте подальше виділення води на поверхню грудки припиниться, окатиш перестане рости, його міцність досягне максимальної величини для даних умов огрудкування.

Доречно відзначити, що ущільнення грудочки відбувається поступово під дією численних ударів різного напрямку, завдяки чому взаємне переміщення часточок відбувається тільки на тих ділянках, де в даний момент опір удару мінімальне. Завдяки такому механізму окатиш на грануляторі під впливом зусиль малої величини досягає щільності брикету, отриманого під тиском до 100 МПа.

Вплив в'язучих добавок у шихту. Відомо, що існує значна кількість способів агрегування дисперсних матеріалів, однак найбільш розповсюдженим з них є метод грануляції скочуванням. Зокрема, виробництво залізородних обкотишів у країні, здійснюване подібним чином, обчислюється десятками мільйонів тонн на рік. Від інших способів огрудкування на обертових поверхнях відрізняється високими показниками по продуктивності й економічності. Для його здійснення звичайно застосовують один із двох типів пристроїв грануляторів – барабанний чи тарілчастий. Відрізняючись конструктивно, обидва згаданих пристроїв працюють по одному принципу і мають практично однакову підготовку шихти перед грануляцією. Технологія огрудкування на них містить у собі наступні операції: підготовка компонентів і їхнє дозування, змішання і зволоження суміші, одержання гранульованого продукту; зміцнення гранул чи термічно гидратаційно; відвантаження і складування. Використання тарілчастого гранулятора в порівнянні з барабанним знижує продуктивність процесу, але забезпечує одержання гранул необхідного розміру і більш міцних. Однак тарілчасті гранулятори металоемні, громіздкі і більш складні по конструкції, чим барабанні.

У процесі грануляції зволожений до пухко-сипучого стану матеріал при участі фізичних явищ, що виникають на розділі рідкої і твердої фаз, агрегується в пухкі грудочки. Останні, завдяки взаємному впливу, а також відцентровим силам, ущільнюються і втрачають надлишкову воду, що утворює плівку на поверхні гранули, що, у свою чергу, адсорбує порцію шихти й у такий спосіб нарощує свій об'єм. З зазначеної причини гранули мають у розрізі чітко виражену шарувату структуру. При огрудкуванні на тарелі укрупнення гранул супроводжується їхнім переміщенням у поверхневій обрії. При досягненні “критичного” розміру гранули,

що витісняються шихтою, що постійно надходить на тарель, пересипаються через її борт і надходять на зміцнення. Звичайно міцність сирих гранул складає 1—5 Н. Вона забезпечується головним чином за рахунок склеювання твердих часток шихти водяними плівками і губиться при висушуванні. У випадку високої дисперсності матеріалу висушені гранули здатні зберігати досить високу міцність, причиною якої є так називані “контактно-конденсаційні” сили міжмолекулярного притягання, рівень яких пропорційний дисперсності шихти. Продуктивність процесу, поряд з фізико-хімічними характеристиками матеріалу і його дисперсністю, визначається також конструкцією гранулятора і режимом його роботи. Для одержання необхідного розміру гранул підбирають відповідний режим роботи гранулятора. Найчастіше варіюють кут нахилу тарелі, місця подачі шихти на неї, точки дозволування шихти, положення шкребків на тарелі.

На нашу думку, доцільно одержувати на складування гранули розміром 10—15 мм, тому що в цьому випадку, з одного боку, зберігається висока продуктивність процесу (рис.1.), з іншого боку — при транспортуванні й утилізації без особливих утруднень можливо використовувати устаткування, звичайно застосовуване в технології одержання заповнювачів для щебеню і гравію, що мають приблизно ті ж розміри.

По своїй конструкції барабанний гранулятор аналогічний барабанним сушаркам, широко застосовуваним у різних галузях промисловості. Це — похила труба з встановленими усередині шкребками і форсунками для розпилення води.

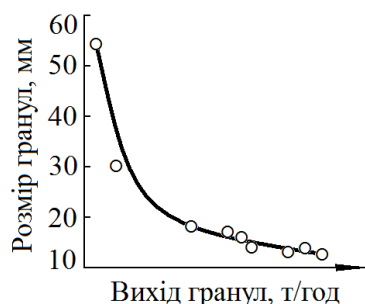


Рисунок 1. - Залежність середнього діаметра гранул від продуктивності гранулятора

При обертанні барабана матеріал, огрудковується, переміщується від високого завантажувального кінця у бік низького розвантажувального. Недоліком даних пристроїв вважається поліфракційний склад продукту, тому при виробництві рудних обкотишів вони звичайно доукомплектовуються грохотами, що дозволяють виділити потрібну монофракцію, а дрібна, некондиційна фракція повертається на укрупнення. При огрудкуванні відходів на складування, у випадку коли немає необхідності домагатися максимальної місткості сховища, використання барабанного гранулятора буде цілком виправданим. Крім згаданих, існує ще ряд конс-

трукцій пристроїв, що гранулюють, однак їхньої можливості нижче, ніж у розглянутих.

Брикетування як альтернатива грануляції окатуванням, стосовно до задач складування відходів, на нашу думку, менш перспективно, тому що не настільки продуктивно, більш капітало- і експлуатаційно затратно, а також вимагає застосування в'язких домішок. Очевидна перевага грануляції окатуванням полягає в характері процесу формування агрегату (або гранули брикету). У брикетуванні формування агрегату відбувається послідовно і при значному зовнішньому тиску. При грануляції ж формування агрегатів і їхнє укрупнення відбувається одночасно в багатьох точках гранулятора. Тому продуктивність огрудкування набагато вище.

Важливо, що ущільнення гранул і їхня міцність забезпечуються за рахунок ефективного використання поверхнево-активних сил, що в кінцевому рахунку дозволяє значно знизити питоме енергоспоживання на одиницю продукції. Для забезпечення міцності гранул до складу шихти вводять сполучні добавки (цемент, вапно й ін.) у кількості 3—15 %, що у ряді випадків грають і пластифікуючу роль, тобто прискорюють накопчування матеріалу, підвищують міцність вологих гранул і поліпшують їхню сферичність. Дешевими заміниками зазначених дорогих в'язких можуть служити пил цементних і вапняних печей, деякі види шлаків у розмеленому стані, висококальцієві золошлаки від спалювання вугілля, сланців, торфу й інші види відходів, що володіють в'язкими властивостями.

Фізико-хімічні характеристики шламів конвеєрного виробництва. Шлам - суспензія води і твердого продукту, що утворюється в результаті очищення технологічних газів і аспіраційного повітря. Шлами класифікують по джерелах утворення.

Конвертерні шлами: стічні води від скрублерів Вентурі (у схемах відводу й очищення газів без допалювання), стічні води від апаратів охолодження і зволоження газів (у схемах відводу й очищення газів з допалюванням окису вуглецю). Хімічний склад приведений у таблиці 1.

У формі обліку утворення і використання залізовмісних шламів на металургійних підприємствах колишнього МЧМ СРСР було прийнято по кожному металургійному виробництву окремо враховувати кількість рідкоплинних шламів і твердих відходів - пилів (ТТИ-2.2-08-86). На деяких підприємствах такий облік ведеться і в даний час.

Залізовмісні шлами, одержувані при очищенні газів сталеплавильного виробництва по способу утворення можна у свою чергу розділити на три частини: шлами механічного, термічного походження і так називані «возгони». Перші виходять у результаті дроблення, стирання, пересипання шихтових і інших матеріалів. Другі утворюються в процесах термічної обробки матеріалів.

Таблиця 1 Хімічний склад шламів конвертерних газоочисток на підприємствах чорної металургії України і Казахстану, % (мас.)

Хімічний склад, %мас.	«Криворіжсталь»			КарМК
	1	2	3	
Fe ₂ O ₃	64,2	72,3	52,7	41,9
FeO	6,58	16,6	11,6	43,5
CaO	9,47	3,30	16,0	11,59
SiO ₂	1,66	2,28	2,93	2,36
Al ₂ O ₃	0,17	0,31	0,36	0,24
MgO	0,42	0,29	14,6	0,71
K ₂ O	0,24	0,16	0,19	0,17
Na ₂ O	0,61	0,20	0,15	0,19
Mn	1,2	1,21	1,05	1,31
P	0,05	0,036	0,048	0,18
S	0,16	0,067	0,22	0,16
Zn	4,16	0,05	0,74	1,02
Pb	0,81	0,03	0,15	0,49
C	0,7	1,11	3,42	2,60

Нарешті, існують шлами, що утворюються в результаті випару різних легкоплавких речовин і наступної конденсації їхньої пари. До них також варто віднести пил кисневих конвертерів, що утворюється в зоні контакту кисневого струменя з чавуном, у результаті розтріскування поверхневої плівки рідини мікроскопічної товщини.

Основи підготовки шламів до утилізації.

Повернення залізовмісних шламів у виробництво пов'язано з рішенням ряду технічно складних задач. До їхнього числа відноситься зневоднювання і технологічна підготовка.

Шлами металургійних виробництв перед утилізацією в більшості випадків спеціально підготовляються. Іноді це викликано підвищеною вологістю продуктів, в інших випадках - високою дисперсністю вхідних у їхній склад чи часток наявності в них шкідливих домішок - оксидів свинцю і цинку і т.д. При утилізації залізовмісних шламів в агломераційному виробництві їхня оптимальна вологість складає 8 - 10%; при малих величинах добавок допускається підвищення вологості до 15 - 20%.

Основними методами підготовки є механічне зневоднювання, змішування, термічна обробка й окискування. Механічні методи зневоднювання дозволяють знизити вологість шламів до 15 - 25%. Подальше зменшення вологості досягається або шляхом термічного зневоднювання (сушінням), або хімічним (добавкою в нього негашеного вапна).

У процесах механічного зневоднювання суспензії розділяють на рідку і тверду фази. Ці процеси можна розбити на двох груп - осадження і фільтрування. При осадженні консистенція суспензії така, що середня відстань між частками перевищує їхній характерний розмір. Під впливом власної ваги зважені в рідині частки опускаються на дно апарата, і в такий спосіб відбувається поділ твердої і рідкої складових. В інших випадках поділ здійснюють за допомогою сил відцентрового поля:

частки спочатку виштовхуються ними до стінок судини а потім згустий шлам осідає під дією власної ваги на дно. Для інтенсифікації процесу поділу перспективним є додаткове застосування методів магнітної флокуляції і електрокоагуляції.

Для зневоднювання шламів застосовують згущувачі (відстійники), класифікатори, вакуум-фільтри, фільтр-преси і центрифуги. За допомогою класифікаторів зі шламу виділяють порівняно великі фракції з розміром часток > 0,25-0,3 мм. Класифікатори розділяються на механічні і спіральні; найбільш уживаними є спіральні, а з механічних - гідроциклони і дугові сита.

Шлам після класифікатора, так називані піски, найчастіше додатково збезводнюють - звичайно на стрічкових вакуум-фільтрах, а зливши обробляють у радіальних чи інших згущувачах. Дискові і барабанні вакуум-фільтри застосовують для зневоднювання шламів із крупністю часток < 0,3 мм, фільтр-преси - для обробки високодисперсних шламів < 0,05 мм. У закордонній практиці для обробки останніх використовують також центрифуги.

Зневоднювання шламів у вітчизняній практиці у випадку досить згущеної вихідної пульпи (600 - 700 г/л твердого) переважно здійснюють у послідовно розташованих спіральних класифікаторах і дискових вакуум-фільтрах, а у випадку щодо розрідженої пульпи (100 - 300 г/л) - у ланцюжку апаратів гідроциклони - спіральні класифікатори - стрічковий вакуум-фільтр. Добавка гідроциклонів дозволяє зменшити кількість громіздких і дорогих спіральних класифікаторів у ланцюжку апаратів. Високодисперсні шлами газоочисток сталеплавильного виробництва збезводнюють, як правило, за допомогою фільтр-пресів.

У зв'язку з інтенсифікацією киснево-конвертерного процесу підсилюється винос з агрегату з газами великих фракцій пилу, що відходять від нього. Тому необхідно проводити класифікацію стічних вод перед їхнім надходженням на основні

спорудження. Для зневоднювання конвертерних шламів найбільше широко застосовуються радіальні відстійники, наприклад, діаметром 30 м, що при питомому навантаженні $2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ дозволяють одержати прояснену воду з залишковим змістом суспензії, що не перевищує 200 мг/л.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методика проведення дослідів.

В Україні щорічно утвориться близько 1 млрд. т техногенних відходів, з яких тільки 10-15% використовуються як вторинні ресурси, а інші надходять у різні сховища. До них відносяться залізо- і вуглецевмісні відходи чорної металургії, вугільної промисловості, машинобудування. Тому у теперішній час на сучасних підприємствах спостерігається тенденція щодо використання у металургії відходів металургійних виробництв (колошниковий пил, пе-

рвинна та вторинна окалина, шлами доменних та сталеливарних виробництв та інші.) Більшою частиною відходи використовуються у агломераційному виробництві та виробництві брикетів.

Метою цієї роботи було дослідження можливості використання відходів металургійних виробництв у процесі виробництва обкотишів. Мета роботи – дослідження впливу вмісту вапна, цементу і твердого палива на металургійні властивості обкотишів, до складу шихти яких, окрім концентрату та в'язучих, надходять відходи металургійних виробництв.

Склад шихти застосованої в дослідженні:

Колошниковий пил – 10%; суміш шламів – 70%; окалина – 10%; концентрат – 10%; +цемент (2%, 4%, 6%) – понад 100% шихти; +паливо (1%, 4%, 7%,) – понад 100% шихти; +вапно (2%, 8%, 5%) – понад 100% шихти.

Таблиця 2

Хімічний склад компонентів шихти. % за масою

Компоненти шихти	Вміст, % за масою								
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe _{зав.}	FeO	Fe ₂ O ₃	C	П.п.п.*
Суміш шламів	1,8	36,16	1,87	1,38	15,88	6,05	16		34,94
Окалина	1,36	1,72	0,43	0,76	70,07	58,57	35,28	2,97	
Концентрат	9,01	1,03	0,34	0,65	63,84	27,4	60,92		
Колошниковий пил	9,94	10,4	1,16	1,31	37,98	7,11	46,43	20,7	21,98
Коксовий дріб'язок	12,40		1,07					80,0	

Підготовка компонентів шихти.

Для складання шихти використовувалися наступні матеріали: концентрат ДМК, колошниковий пил, суміш шламів, окалина, коксовий дріб'язок, вапно, цемент. Суміш шламів складається з конвертерного і доменного шламів. Концентрат ДМК – добір фракції до 0,1мм; колошниковий пил – сушіння в сушильній шафі при температурі 120-150°C, добір фракції 0-0,5мм; коксик – добір фракції 0-3мм; суміш шламів – фракція -1мм; окалина – фракція -1мм; вапно – фракція -1мм; цемент фракція – 74мкм.

У складі шихти змінювались тільки вміст зв'язуючих добавок (цемент, вапно) та палива. Вага шихти складала 3 кг (без обліку цементу, вапна і палива, тому що останні додавались поверх 3кг). Змішування шихти при безопалювального окускуванні є найважливішою технологічною операцією. Змішування шихтових матеріалів проводилося вручну шляхом пошарового укладання матеріалів на піддон з наступним перемішуванням шарів між собою. Змішування матеріалів проводилося в кульовому млині протягом 15 хвилин. Після чого змішана шихта вивантажувалася і зволожувалася.

Змішану шихту зволожили 9% води. Зволоження шихти здійснювалося пошаровим методом

(шихта/вода/ шихта), з наступним змішуванням шарів і додатковим зволоженням. Зволожена шихта витримувалася у плінні 20 хвилин, потім завантажувалася на гранулятор, робоча поверхня якого була попередньо зволожена.

Обкотиші були отримані на малому грануляторі (діаметр робочої поверхні гранулятора 1м).

Установка грануляції складається з тарелі гранулятора, електродвигуна постійного струму, черв'ячного редуктора, пульта управління. Швидкість обертання малого гранулятора при якій проводилися дослідження складало 40 об/хв. Час перебування шихти на грануляторі складало 15 хвилин. Після огрудування обкотиші вивантажувалися з гранулятора і через добу розсівалися по фракціях (8 – 10; 10 – 12; 12 – 15; 15 – 20 мм.)

Визначення міцності

Міцність обкотишів визначали за допомогою розривної машини Р-0,5 з ричажно-маятниковим силовимірником. Машина Р-0,5 призначена для випробування зразків на розтягання, стиснення і вигин. Для проведення випробувань відкожної фракції з різним вмістом цементу, вапна та палива відбиралися 6 обкотишів. Результати записувалися у таблицю.

Протоколи випробувань №1...№13

Фракція, мм	Середнє арифметичне значення міцності на роздавлювання, кг												
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12	№13
8-10	6,3	11	10,7	7,4	8,9	12,1	8,1	13	13,7	12,6	8,6	7,7	11,7
10-12	9,3	15,1	15,7	10,3	11,7	14,6	12,3	24	21,4	17,6	14,3	11,1	14,9
12-15	18,4	20,4	25,1	11,4	12,4	25	16,1	31,7	36,9	26,6	14,6	12,6	25,7
15-20	40,7	47	43,4	35,9	21,9	34,1	30,3	40,1	47,1	32,7	24,7	33,6	41,6

Поліноміальний опис процесу

Для поліноміального опису процесу скористаємося трьох факторним планом Бокса - Бенкіна (центральне композиційне ортогональне планування другого порядку для трьохфакторного експерименту).

Нумерацію факторів вибираємо наступну:

1. Вміст вапна – X_1 ,
2. Вміст цементу – X_2 ,
3. Вміст твердого палива – X_3 ,

Таблиця 3 План Бокса – Бенкіна ($B - B_3$) для $k=3$.

Номер досліджу	Фактор			Номер досліджу	Фактор			Номер досліджу	Фактор		
	X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3
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

Вибираємо інтервал варіювання факторів і визначаємо величини рівнів факторів (інтервал варіювання дорівнює 10 – 25% максимального значення фактора) для приведення до умов стандартної матриці (див. табл. 4):

Таблиця 4 - Натуральні значення факторів для рівнів.

Рівень	X_1 , %	X_2 , %	X_3 , %
верхній	8	6	7
нульовий	5	4	4
нижній	2	2	1
Інтервал варіювання	3	2	3

Визначаємо натуральні значення факторів і розраховуємо склад агломераційної шихти для кожного з тринадцяти дослідів.

Коефіцієнти регресії і їхньої помилки можна підрахувати після реалізації плану по спрощених формулах:

$$b_0 = T_1 \sum_{i=1}^n y_i - T_2 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_i^2 \cdot y_i ; \quad (1)$$

$$b_i = T_3 \sum_{j=1}^n x_i \cdot y_j ; \quad (2)$$

$$b_{ii} = T_4 \sum_{j=1}^n x_i^2 y_j + T_5 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_i^2 \cdot y_j - T_2 \sum_{j=1}^n y_j ; \quad (3)$$

$$b_{ij} = T_6 \sum_{j=1}^n x_i \cdot x_j \cdot y_j ; \quad (4)$$

$$S_{b0} = T_7 S_{on}; \quad (5)$$

$$b_0 = 26;$$

$$b_1 = 0.125 \cdot \sum x_1 \cdot y = 0.125 \cdot (18.4 + 20.1 - 25.1 - 11.8 + 15.4 + 23.9 - 18.7 - 29.7) = 0.9375;$$

$$b_2 = 0.125 \cdot \sum x_2 \cdot y = 0.125 \cdot (18.4 - 20.1 + 25.1 - 11.8 + 31.9 + 26.6 - 14.6 - 16.2) = 4.9;$$

$$S_{bi} = T_8 S_{on}; \quad (6)$$

$$S_{bii} = T_9 S_{on}; \quad (7)$$

$$S_{b0} = T_{10} S_{on}; \quad (8)$$

Матрицю, натуральні значення факторів і значення параметрів оптимізації заносимо в таблицю 4. Реалізуємо (виконаємо) усі тринадцять дослідів, забезпечивши рандомізацію. Повторимо двічі дослід, у яких параметри оптимізації (у даному випадку – міцність на роздавлювання) мають максимальне і мінімальне значення. Також повторимо двічі дослід для нульової точки. Результати дослідів заносимо в таблицю 3.

Аналіз експериментальних даних

Складання моделі

Використовуючи розрахунковий коефіцієнт T_i за формулами обчислимо коефіцієнти регресії полінома:

$$\begin{aligned}
 b_3 &= 0.125 \cdot \Sigma x_3 \cdot y = 0.125 \cdot (15.4 - 23.9 + 18.7 - 29.7 + 31.9 - 26.6 + 14.6 - 16.2) = -1.975; \\
 b_{12} &= 0.25 \cdot \Sigma x_1 x_2 y = 0.25 \cdot (18.4 - 20.1 - 25.1 + 11.8) = -3.75; \\
 b_{13} &= 0.25 \cdot \Sigma x_1 x_3 y = 0.25 \cdot (15.4 - 23.9 - 18.7 + 29.7) = 0.625; \\
 b_{23} &= 0.25 \cdot \Sigma x_1 x_2 y = 0.25 \cdot (31.9 - 26.6 - 14.6 + 16.2) = 6.9; \\
 b_{11} &= 0.25 \cdot (18.4 + 20.1 + 25.1 + 11.8 + 15.4 + 23.9 + 18.7 + 29.7) + 0.1875 [(18.4 + 20.1 + 25.1 + 11.8 + 15.4 + 23.9 + 18.7 + 29.7) + \\
 &\quad + (18.4 + 20.1 + 25.1 + 11.8 + 31.9 + 26.6 + 14.6 + 12.6) + (15.4 + 23.9 + 18.7 + 29.7 + 31.9 + 26.6 + 14.6 + 12.6)] - \\
 &\quad - 0.5(18.4 + 20.1 + 25.1 + 11.8 + 15.4 + 23.9 + 18.7 + 29.7 + 31.9 + 26.6 + 14.6 + 16.2 + 26) = 40.775 + 93.3 - 139.2 = -5.125; \\
 b_{22} &= 0.25 \cdot (161.1) + 0.1875(163.1 + 161.1 + 173.4) - 0.5 \cdot 278.4 = 40.275 + 93.3 - 139.2 = -5.625; \\
 b_{33} &= 0.25 \cdot 173.4 + 93.3 - 139.2 = -2.55;
 \end{aligned}$$

Отже, питома продуктивність агломераційного процесу описується поліномом:

$$Y = 26 + 0.9375x_1 + 4.9x_2 - 1.975x_3 - 3.75x_1x_2 + 0.625x_1x_3 + 6.9x_2x_3 - 5.125x_1^2 - 5.625x_2^2 - 2.55x_3^2$$

Розрахункові значення міцності на роздавлювання:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 26 + 0.9375 + 4.9 - 3.75 - 5.125 - 5.625 = 17.3375; \\
 y_2 &= 26 + 0.9375 - 4.9 + 3.75 - 5.125 - 5.625 = 15.0375; \\
 y_3 &= 26 - 0.9375 + 4.9 + 3.75 - 5.125 - 5.625 = 22.9625; \\
 y_4 &= 26 - 0.9375 - 4.9 - 3.75 - 5.125 - 5.625 = 10.3; \\
 y_5 &= 26 + 0.9375 - 1.975 + 0.625 - 5.125 - 2.55 = 17.9125; \\
 y_6 &= 26 + 0.9375 + 1.975 - 0.625 - 5.125 - 2.55 = 20.6125; \\
 y_7 &= 26 - 0.9375 - 1.975 - 0.625 - 5.125 - 2.55 = 14.7875; \\
 y_8 &= 26 - 0.973 + 1.975 + 0.625 - 5.125 - 2.55 = 19.959; \\
 y_9 &= 26 + 4.9 - 1.975 + 6.9 - 5.625 - 2.55 = 27.65; \\
 y_{10} &= 26 + 4.9 + 1.975 - 6.9 - 5.625 - 2.55 = 17.8; \\
 y_{11} &= 26 - 4.9 - 1.975 - 6.9 - 5.625 - 2.55 = 12.6; \\
 y_{12} &= 26 - 4.9 + 1.975 + 6.9 - 5.625 - 2.55 = 16.2; \\
 y_{13} &= 26;
 \end{aligned}$$

Поліном, що описує залежність міцності на роздавлювання від вмісту вапна, цементу та твердого палива:

$$Y = 26 + 0.9375 \cdot (X_1 - 5/3) + 4.9 \cdot (X_2 - 4/2) - 1.975 \cdot (X_3 - 4/3) - 3.75 \cdot (X_1 - 5/3) \cdot (X_2 - 4/2) + 0.625 \cdot (X_1 - 5/3) \cdot (X_3 - 4/3) + 6.9 \cdot (X_2 - 4/2) \cdot (X_3 - 4/3) - 5.125 \cdot (X_1 - 5/3)^2 - 5.6 \cdot (X_2 - 4/2)^2 - 2.55 \cdot (X_3 - 4/3)^2$$

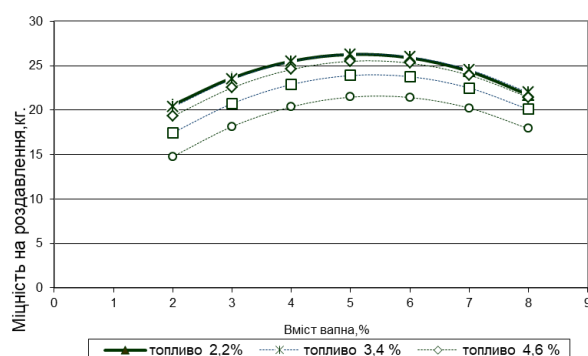


Рисунок 1 Вплив вмісту вапна на металургійні властивості обкотишів (вміст цементу 4%)

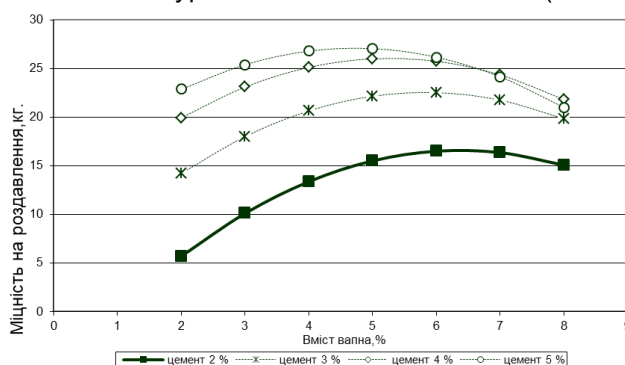


Рисунок 2 Вплив вмісту вапна на металургійні властивості обкотишів (вміст палива 4%)

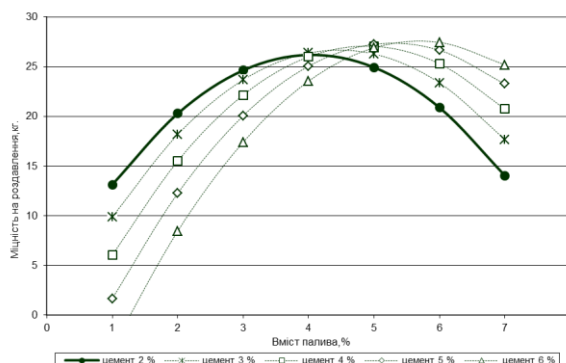


Рисунок 3 Вплив вмісту палива на металургійні властивості обкотишів (вміст вапна – 5%)

Висновки

Найбільша міцність обкотишів (25-27 кг/об.) спостерігається при вмісті вапна 4 – 7% (при вмісті цементу 4 - 5%, палива – 4 – 5,5%). Міцність обкотишів значно знижується при підвищенні вмісту твердого палива в шихті, що підтверджується даними, де максимальні значення міцності обкотишів (25 кг/об.) досягаються тільки при введенні до складу шихти значної кількості цементу (~8%), що зажадає додаткової кількості вапняку для його офлюсування. Для обкотишів зі вмістом цементу 2% максимальна міцність (17 кг/об.) досягається при додаванні в шихту 6,2% вапна, а максимальна міцність (27 кг/об.) для обкотишів зі вмістом 5% цементу – при 4,5% вапна. Тобто при підвищенні

вмісту цементу в шихті для одержання максимального показника міцності потрібно менша кількість вапна і навпаки.

Зниження міцності, що спостерігається, зв'язане з тим, що надлишок вапна починає втручатися і негативно впливати на процеси твердіння цементу, змінюючи співвідношення речовин і мінералів, які приймають участь у процесі (CaO , SiO_2 , Al_2O_3).

Для забезпечення міцності гранул до складу шихти вводять сполучні добавки (цемент, вапно й ін.) у кількості 3...15 %, що у ряді випадків грають і пластифікуючу роль, тобто прискорюють накочування матеріалу, підвищують міцність сирих гранул і поліпшують їх сферичність.

Бібліографічний опис

- Використання побіжних продуктів збагачення залізних руд у будівництві на Півночі/Прокоф'єва В. В., Боженов П. И., Сухачева А. И., Еремін Н. Я.— Л.: Стройиздат, 1986.— 176с.
- Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке — М.: Металлургия, 1978. — 208с.
- Сулименко Л. М., Альбац Б. С. Агломерацийні процеси у виробництві будівельних матеріалів.— 1994.— 247 с.
- КлассенП. В., Гришаев И. Г. Основы техники гранулирования.— М.: Химия,1982.— 272 с.
- Видалення і складування золошлаков теплових електростанцій. Варіанти і перспективи розвитку/Вишня Б. Л., Уфимцев В. М., Сирота Ю. Л. і ін.//Гідротехнічне будівництво.— 1994.— № 11.— С. 24—29.
- Вінер А. М., Кашкаха А. В., Уфимцев В. М. Система видалення і складування золошлаковБерезовской ГРЭС-1, попередньо гранульованих у виді самотвердуючих сумішей//Охрана навколишнього середовища на ТЭС і АЭС: Сб. науч. тр. АТОП.— М.: Энергоиздат, 1985— С. 20—25.
- Уфимцев В. М. і ін. Результати дослідно-промислової грануляції золи березовського вугілля//Енергетичне будівництво.— 1984.— № 11.— С. 51—53.
- Зміна будівельних властивостей гранульованої золи КАТЭК і їхній вплив на навколишнє середовище при збереженні в атмосферних умовах/УфимцевВ. М., КайбичеваМ. Н., Доманская И. К. і ін.//Енергетичне будівництво.— 1987.— № 6.— С. 78—79.
- Андоньев С. М., Филипов О. В. Пылегазовые выкиды підприємств чорної металургії: Изд.2-і, дополн., перераб. - М.: Металургия, 1979.
- Комплексне використання відходів / Б. М. Равнч. В. И. Окладников, И. П. Лыгач і ін. - М.: Химия,1988.
- Остапенко П. Е., Мясников Н. Ф. Безвідхідна технологія переробки руд чорних металів / Під ред. Б. Н. Ласкорина. - М: Надра, 1988.
- Поляків В. В. Ресурсозбереження в чорній металургії. - М.: Машинобудування, 1993.
- Сосковец О. И. Технічне переозброєння і розвиток металургії і Росії // Сталь. - 1993. - №6. - С. 1-6.
- Утилізація пилів і шлаків у чорній металургії/А. И. Толочко. В. И. Славин, 10. М. Супрун і ін. - Челябинськ: Металургия, 1990.
- Этерс Ф. Від сировини до сталевого злитка // Чорна металургия. -1979.- № 12. -С. 3-10.
- анализ способов окомкования железорудной шихты, направленных на управление пластической деформацией зародышей в технологии производства окатышей,
- Хопунов Э.А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 429 с.
- Лившиц Б.А., Васильев Г.С. Исследование механических свойств основных компонентов железорудных агломератов// Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1964. – № 6. – С. 23—25.

19. Сулименко С.Е. Перспективные направления создания экологически чистой технологии получения агломерата повышенного качества в современных условиях. Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск. – 2014. – Выпуск 4 (93). – С. 32–38.
20. Романенко В.П., Попов Г.Н. Технология двухстадийного окомкования агломерационной шихты // Республиканская научно-техническая конференция «Теоретические основы и технология подготовки металлургического сырья к доменной плавке. – Днепропетровск, 1980. – С. 13–15.
21. Коршиков Г.В., Шаров С.И. и др. Влияние способа подачи топлива, его вида и крупности на показатели процесса спекания концентрата КМА // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1971. – № 3. – С. 37–39. – № 6. – С. 39–42.
22. Вылупко Е.Е., Игнатов Н.В., Губа А.В., Усенко В.А., Белова А.П. Получение окускованного железорудного материала
23. блочно-ячеестого строения // Современные проблемы металлургии. – 2011. – № 14. – С. 50–57.
24. Худяков А.Ю., Бойко М.Н., Баюл К.В., Ващенко С.В., Полякова Н.В., Петренко В.И. Альтернативные способы грануляции тонкоизмельченных железорудных концентратов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – № 1 (1). – С. 48–53.
25. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна: учебник для вузов. – К.: Вища школа, 1981. – 496 с.

Reference

1. VykorystanniapobizhnykhproduktivzbahachenniazaliznykhрудubudivnytstvinaPivnochi/ProkofievaV. V., BozhenovP. Y., SukhachevaA. Y., EremynN. Ya.— L.: Stroyizdat, 1986.— 176s.
2. KorotychV.Y. Osnovyteoryutekhnolohyydohotovkysyriakdomennoiplavke – M.: Metallurhiya, 1978. – 208s.
3. Sulymenko L. M., Albats B. S. Ahlomeratsiini protsesy u vyrobnytstvi budivelnymaterialiv.— 1994.— 247 s.
4. KlassenP. V., HryshaevY. H. Osnovy tekhniki hranulirovaniya.— M.: Khimiia,1982.— 272 s.
5. Vydalennia i skladuvannia zoloshlakov teplovykh elektrostantsii. Varianty i perspektivy rozvyt-ku/Vyshnia B. L., Ufymtsev V. M., Syrota Yu. L. i in.//Hidrotekhnichne budivnytstvo.— 1994.— № 11.— S. 24–29.
6. Viner A. M., Kashkakha A. V., Ufymtsev V. M. Systema vydalennia i skladuvannia zoloshlakovBere-zovskoi HR3S-1, popередно hranulovanykh u vydi samotverdeishchnykh sumishei//Okhrana navkoly-shnoho seredovyscha na TES i AES: Sb. nauch. tr. ATOP.— M.: Enerhoizdat, 1985— S. 20–25.
7. Ufymtsev V. M. i in. Rezultaty doslidno-promyslovoi hranuliatsii zoly berezovskoho vuhil-lia//Enerhetychne budivnytstvo.— 1984.— № 11.— S. 51–53.
8. Zmina budivelnym vlastvostei hranulovanoi zoly KAT3K i yikhniy vplyv na navkolyshnie sere-dovyshe pry zberezhenni v atmosferykh umovakh/UfymtsevV. M., KaibychеваM. N.,Domanskaia Y. K. i in.//Enerhetychne budivnytstvo.— 1987.— № 6.— S. 78–79.
9. Andonev S. M., Fylypev O. V. Pyle hazovyye vykydy pidpriemstv chornoj metalurhii: Yzd.2-i, dopoln., pererab. - M.: Metalurhiia, 1979.
10. Kompleksne vykorystannia vidkhodiv / B. M. Ravnch. V. II. Okladnykov, Y. P. Lyhach i in. - M.: Khi-miia,1988.
11. Ostapenko P. E., Miasnykiv N. F. Bezvidkhidna tekhnolohiia pererobky rud chornym metaliv / Pid red. B. N. Laskoryna. - M: Nadra, 1988.
12. Poliakov V. V. Resursozberezhennia v chornii metalurhii. - M.: Mashynobuduvannia, 1993.
13. Soskovets O. II. Tekhnichne pereozbroiennia i rozytok metalurhii i Rosii // Stal.- 1993.- №6.- S. 1-6.
14. Utylizatsiia pyliv i shlamiv u chornii metalurhii/A. Y. Tolochko. V. Y. Slavyu, 10. M. Suprun i in. - Cheliabinsk: Metalurhiia, 1990.
15. Eters F. Vid syrovyny do stalevoho zlytka // Chorna metalurhiia. -1979.- № 12. -S. 3-10.
16. analiz sposobov okomkovaniya zhelezorudnoi shykhty, napravlennykh na upravlenye plastiches-koj deformatsyei zarodyshei v tekhnolohii proizvodstva okatyshhei,
17. Khopunov Э.А. Selektivnoe razrusheniye myneralnogo y tekhnolohiiho сырия. – Ekaterynburh: ООО «UYPTs», 2013. – 429 s.
18. Lyshyts B.A., Vasylev H.S. Yssledovanye mekhanicheskyykh svoistv osnovnykh komponentov zhelezorudnykh ahlomeratov// Yzvestiya VUZov. Chernaia metallurhiya. – 1964. – № 6. – S. 23–25.
19. Sulymenko S.E. Perspektivnye napravleniya sozdaniya ekologicheskoy chystoi tekhnolohiiy polu-cheniya ahlomerata povyshennogo kachestva v sovremennykh usloviyakh. Systemnye tekhnolohiiy. Re-hionalnyi mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. – Dnepropetrovsk. – 2014. – Выпуск 4 (93). – С. 32–38.
20. Romanenko V.P., Popov H.N. Tekhnolohiya dvukhstadiynoho okomkovaniya ahlomeratsyonnoi shykhty // Respublykanskaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Teoreticheskiye osnovy y tekhnolohiya podhotovky metallurhicheskogo сырия k domennoi plavke. – Dnepropetrovsk, 1980. – С. 13–15.
21. Korshikov H.V., Sharov S.Y. y dr. Vlyanye sposoba podachy toplyva, eho vyda y krupnosty na po-kazately protsessa spekaniya kontsentrata KMA // Yzvestiya VUZov. Chernaia metallurhiya. – 1971. – № 3. – С. 37–39. – № 6. – С. 39–42.
22. Vylupko E.E., Yhnatov N.V., Huba A.V., Usenko V.A., Belova A.P. Poluchenye okuskovannoho zhelezorudnogo materyala
23. blochno-yacheestogo stroeniya // Sovremennyye problemy metallurhiiy. – 2011. – № 14. – S. 50–57.
24. Khudiakov A.u., Boiko M.N., Baiul K.V., Vashchenko S.V., Poliakov N.V., Petrenko V.Y. Alternativnye sposoby hranuliatsyy tonkoizmelchennykh zhelezorudnykh kontsentratoov// Chernaia metallurhiya. Biulleten nauchno-tekhnicheskoi y ekonomicheskoi ynformatsyy. – 2018. – № 1 (1). – S. 48–53.
25. Efymenko H.H., Hymelfarb A.A., Levchenko V.E. Metallurhiya chuhuna: uchebnyk dlia vuzov. – K.: Vyshcha shkola, 1981. – 496 s.