**4 ВИКОРИСТАННЯ ДОМЕННИХ ШЛАКІВ**

**4.1** **склад і властивості доменних шлаків**

Шлак, як і чавун, — кінцевий продукт доменної плавки. У доменній печі шлаки утворюються з порожньої породи рудної частини шихти, флюсів і золи коксу. Постійність хімічного і фізичного складу залізовмісної сировини, палива і флюсів забезпечує рівний хід доменного процесу, однорідність складу і властивостей доменного чавуну і шлаку. Останнє дуже важливе для якості як чавуну, так і шлаків. Шлак, утворюючись в процесі високотемпературних реакцій, отримує великий запас теплової і хімічної енергії, чім вигідно відрізняється від первинної мінеральної сировини. Раціонально використовувати цей запас енергії при виробництві гранульованого шлаку, пористих заповнювачів, шлакової вати і шлакоситалів — одне з найважливіших завдань виробництва.

По хімічному складу доменні шлаки діляться на три групи: основні, нейтральні і кислі. До основних відносяться шлаки, що мають модуль основності

 

більше одиниці, в нейтральних він дорівнює одиниці, а в кислих — менше одиниці.

Основні шлаки утворюються при виплавці криворізьких руд на високосірчистому коксі з донецького вугілля, містять велику масову частку оксиду кальцію (46—49%) і порівняно невисоку — глинозему (до 10%). Основні шлаки складають більше половини виходу всіх доменних шлаків країн СНД. До них відносяться шлаки всіх заводів України, окрім кислих шлаків заводу «Азовсталь», що утворюються при плавці керченських руд.

Більшість основних шлаків, головним чином ті, які містять понад 43% СаО і менше 8% А12О3, при повільному охолоджуванні схильні до силікатного розпаду в результаті поліморфного перетворення. Використання таких шлаків для виробництва пемзи і. щебеня без попередньої стабілізації утруднено, а інколи абсолютно неможливо. Їх доцільно переробляти переважно способом грануляції. Розпад може відбуватися і в результаті гідратації оксидів або сульфідів (СаО — вапняний, FеS — залізистий і MnS — марганцевистий розпад).

Можлива внутрішньодоменна стабілізація шлаків за рахунок підвищення в шихті, а отже, і в шлаку, кількостей MgO і А12О3. Необхідно прагнути до здобуття розплаву, що містить не більше 6—12% MgO, з врахуванням наявності в шлаках глинозему.

Нейтральні шлаки містять 40—44% СaО. До них відносяться доменні шлаки Європейської частини Росії, що утворюються при плавці руд Курської магнітної аномалії і Північно-західного району на коксі, отриманому з використанням в шихті печорського і кузнецького вугілля.

Кислі доменні шлаки в даний час складають одну третину виходу всіх шлаків на пострадянському просторі. Це доменні шлаки Уралу, Сибіру, Казахстану, які виходять від плавки місцевих руд на коксі з вугілля кузнецького і карагандинського. Вони мають низький вміст оксиду кальцію (35—42%) і вище — глинозему (10—15%). З кислих шлаків можна виготовляти якісне литво і волокнисті вироби.

 У перспективі вміст оксиду магнію в доменному шлаку повинен зрости. У цьому зацікавлені самі металурги, оскільки наявність оксиду магнію в оптимальних межах знижує в'язкість шлаку і підвищує його здатність десульфурувати чавун. Для використання в цементній промисловості доменних шлаків масову долю оксиду магнію в них бажано обмежити на заводах Півдня і Центру в межах 5—6%, а на заводах Уралу і Сходу — 12—15%.

Доменний шлак з масовою долею MgO до 18%, який хоча і декілька поступається по активності шлаку з меншим вмістом оксиду магнію, допустимо застосовувати у виробництві цементу як гідравлічний компонент, не побоюючись нерівномірності зміни об'єму бетону.

Шлак, що містить більше 18% MgO, виділяє вільний оксид магнію (периклаз) в процесі грануляції. Вироби з шлакопортландцементу, до складу якого введений такий шлак, не витримують випробувань на рівномірність зміни об'єму.

У нашій країні експериментально доведена можливість вживання магнезійних доменних шлаків як сировини — компонента при виробництві портландцементного клінкеру. Масова доля оксиду магнію в такому клінкері допустима в межах 6—8,5%, а у шлаці — в межах 13—22%.

Для запобігання силікатному розпаду шлаку при виробництві пемзи, щебеня і інших матеріалів можлива його кристалохімічна позадоменна стабілізація шляхом введення в розплав деяких добавок. В даний час як стабілізуюча добавка рекомендується апатитовий концентрат (0,3% маси шлаку в перерахунку на Р2О5). Апатит можна замінити сталеплавильними фосфат-шлаками, що містять еквівалентну кількість Р2О5.

Всеросійський науково-дослідний інститут будівельних матеріалів рекомендує для стабілізації доменних шлаків при виробництві пемзи вводити в розплав за допомогою стислого повітря 0,3% апатитового концентрату і 0,7% колошниковому пилу, що містить близько 40% Fe у вигляді FеO і Fe2O3. Кисень оксидів заліза і стислого повітря створює в шлаковому розплаві окислювальну атмосферу, необхідну для досягнення кристалохімічної стійкості шлаку. Колошниковий пил сприяє збільшенню кількості центрів кристалізації, але підвищує об'ємну масу шлакової пемзи.

При виплавці передільних і ливарних чавунів, які складають основну долю металу в доменному виробництві, отримують шлаки переважно з потрійною діаграмою оксидів SiO2—А12О3—СаО. Кристалізаційна здатність шлаків, ця найважливіша технологічна властивість, тісно пов'язана з їх мінералогічним складом. Так, моносилікати MeO•SiO2 мають відносно високу кристалізаційну здатність і застигають в «скло» лише при швидкому охолоджуванні, що характерне для основних шлаків. Навпаки, деякі двосилікати MeO•2SiO2 кристалізуються погано і здатні застигати в «скло» навіть при повільному охолоджуванні. До них відносяться кислі шлаки, які через низьку в'язкість називають «довгими» на відміну від основних :— «коротких».

Серед шлаків заводів чорної металургії перше місце за об'ємом і значущості для народного господарства країни належить доменним шлакам. Їх ресурси доки використовуються не повністю, хоча на ряді передових підприємств («Азовсталь», .Новолипецькому, Макіївському, Комунарському) вони переробляються повністю, а доменні цехи Донецького, Краматорського, Єнакіївського заводів переробляють 90% шлаків. В цілому на підприємствах чорної металургії переробляється близько 90% доменних шлаків, що утворюються.

В цілях зниження витрати коксу бажана робота доменних печей з мінімальним виходом шлаку. Проте при цьому ускладнюється видалення з чавуну сірки. Підвищенню продуктивності доменної печі при одночасному зниженні витрати коксу, питомого виходу шлаку і вмісту сірки в чавуні сприяє низка заходів, а саме: збільшення вмісту заліза в шихті, її оґрудкування з одночасним офлюсуванням, поліпшення фізичних властивостей коксу при зниженні вмісту в нім золи, розробка оптимальної технології доменної плавки.

Розрахунками показано, що за оптимальних умов (при вмісті кисню в дутті 30%, температурі дуття 1200°С, витраті природного газу 120 м3/т чавуну і масовій долі заліза в шихті 56—58%) мінімальний вихід шлаку для здобуття чавуну з масовою долею сірки до 0,025%, складає для доменних печей тих, що працюють на коксі з вугілля Донецького басейну з 1,8—1,9% S — близько 240—260 кг/т чавуну. По цілому ряду технологічних причин фактичний вихід шлаку значно (на 40%) вище теоретичного і складає в середньому близько 400 кг/т чавуну.

Враховуючи велику потужність сучасних доменних печей, найбільш доцільна придоменна переробка шлаку. Для працюючих печей шлакопереробку доцільно наближати до доменних цехів, що зменшить втрати шлаку з ковшовими залишками, поліпшить їх гідравлічні властивості і понизить транспортні витрати.

**4.2** **Грануляція доменних шлаків**

Грануляція — найпоширеніший на наших заводах спосіб переробки доменних шлаків. Грануляції піддається понад 80% рідких доменних шлаків.

При швидкому охолоджуванні водою або парою вогненно-рідкий шлак дробиться на дрібні зерна — гранули. Більшість зерен не встигають закристалізовуватися і залишається в аморфному (скловидному) стані з великим запасом внутрішньої енергії, що збільшує їх гідравлічну активність, яка залежить не лише від хімічного, але і від мінералогічного складу шлаку. Кристалічні шлаки мають активність лише за наявності каталізаторів. Скловидний стан сприяє прояву в’яжучих властивостей шлаків.

Процес грануляції може здійснюватися трьома способами: мокрим, напівсухим і сухим. Сухий спосіб в даний час не застосовується, і на підприємствах працюють установки напівсухої і мокрої грануляції. Витрата води при мокрій грануляції складає близько 3 м3/т грануляту, при напівсухій — 2 м3/т.

**Мокра грануляція** ведеться на центральних установках. Цим способом виробляється приблизно 15—20% всього гранульованого шлаку. Вогненно-рідкий шлак виливають з ковшів в жолоб, по якому він стікає в басейн з водою. Вода, пара, а також гази, що містяться в шлаку, подрібнюють його на дрібні зерна.

Гранульований шлак, отриманий мокрим способом, містить 15—30% вологи, яка є баластом. При транспортуванні в зимовий час вологі шлаки легко змерзаються, що утрудняє і здорожує їх вантаження і вивантаження. Крім того, для сушки шлаків перед помелом потрібно багато палива. Тому установки мокрої грануляції неперспективні.

Кращі техніко-економічні показники отримують на центральних жолобних установках , де гранулят звільняється від значної кількості води на складі, а потім відвантажується у вагонах або самоскидах.

**Напівсуха грануляція** найбільш перспективна. На установках напівсухої грануляції переробляється близько 77% доменного шлаку.

В даний час напівсуха грануляція виробляється на барабанних, гідрожолобних і гідроударних установках. Гранульований шлак має вологість 7—15%.

Барабанні установки, розташовані поза доменними цехами, застосовуються для грануляції доменних шлаків на Кузнецькому, Магнітогорському і Нижньотагільському металургійних комбінатах в Росії, а також на. Руставському заводі в Грузії. Будівництво нових установок цього типа не намічається. Ці установки мають наступні недоліки: 1) частина барабана, що обертається, швидко зношується унаслідок дії високої температури, а також абразивної дії шлаку; 2) частина шлаку, витягуючись в нитці і перетворюючись на пластівці, виноситься з барабана і забруднює повітряний басейн на ділянці грануляції.

Установки гідрожолобні також розташовуються поза доменним цехом (рис. 3). Рідкий шлак зливається з ковша в приймальний похилий лоток, стікаючи по якому він потрапляє в гідрожолоб.



1 — ківш; 2 — труба для подачі води; 3 — приймальний латок; 4 — ділянка гідрожолобу з гідронасадками; 5 — гідрожолоб

Рисунок 3 - Установка гідрожолобна для грануляції доменного шлаку.

У голівці гідрожолобу встановлені гідронасадки, в які поступає по трубі вода під тиском 0,6—0,7 МПа. Насадки розташовують з таким розрахунком, аби забезпечувалася лоткообразна форма водяного потоку. Струмені води розривають потік шлаку на окремі гранули, охолоджують їх і відкидають на відстань 10—25 м від кінця гідрожолобу на майданчик складу.

Довжина жолоба складає 8—10.метров, приймальний лоток має ухил у бік гідрожолобу під кутом біля 35—40°.

Установки гідрожолобні експлуатуються на ММК, НТМК, Орсько-халіловському металургійному комбінаті, Карагандинському металургійному комбінаті, Новоліпецкому, Челябінському і Західно-сибірському заводах (Росія); на українських заводах «Азовсталь», Макіївському,, Єнакіївському і деяких інших. Установки гідрожолобні високопродуктивні, дають гранульований шлак зниженої вологості, прості по конструкції і надійні в експлуатації. Робочий тиск води, рівний 0,4—0,6 МПа, забезпечує безпеку переробки шлакових розплавів навіть в разі попадання рідкого чавуну, що дозволяє максимально використовувати шлаковий розплав. Установки гідрожолобні найбільш ефективні зі всіх існуючих позапічних установок для грануляції шлаку. Намічається поступово замінити всі існуючі установки мокрої грануляції на гідрожолобні.

Гідроударні установки споруджуються також за межами доменного цеху. Вони мають приймальну ванну, жолоб з дозуючим пристроєм, лоток і гідроударний. апарат. З приймальної ванни рідкий шлак через дозуючий жолоб подається на лоток, де водою з гідромонітора, що поступає під тиском 0,65—0,70 МПа, гранулюється і несеться на склад; по дорозі на склад грануляція шлаку завершується.

В даний час гідроударні установки працюють на Алапаєвському металургійному заводі. Проте в експлуатації вони складні, працюють незадовільно, тому неперспективні.

Недолік центральних грануляційних установок, що споруджуються за межами доменного цеху, полягає в тому, що для них потрібна значна протяжність залізничних колій, великий парк шлаковозних ковшів і локомотивів. Перевезення 1 т/км шлаку обходиться близько 1,5 грн. За час транспортування температура вогненно-рідкого шлаку знижується на 100—150°С, що погіршує якість грануляту як матеріалу для виробництва в’яжучих речовин. Крім того, 30—35% шлаку йде на утворення кірок, коржів і настилів в ковшах. Це визначає відносно низький вихід гранульованого шлаку (не більше 75%) з вихідного вогненно-рідкого розплаву.

З метою зменшення утворення ковшових залишків і повнішого використання вогненно-рідкого розплаву, економії транспортних витрат, зменшення кількості шлаковозних ковшів і локомотивів, що знаходяться в обороті, поліпшення гідравлічних властивостей шлаку, центральні грануляційні установки доцільніше будувати як можна ближче до доменних цехів. Оптимальним засобом для зниження втрат вогненно-рідких шлаків і поліпшення техніко-економічних показників їх виробництва є придоменна переробка шлакових розплавів з ліквідацією парку шлаковозів.

Київським Діпробудмом в співдружності з Київським політехнічним інститутом і ВНДІМТом розроблені установки придоменної грануляції, що дозволяють частково використовувати фізичну теплоту шлаків (рис. 4). Особливістю установки, що працює на Салдінському металургійному заводі, є вживання як перекачуючого засобу не насосу, а ерліфту. При перекачуванні гарячої пульпи (100°С) насоси унаслідок кавітації і сильного абразивного зносу частин, що обертаються, виходять із ладу, ККД їх зменшується. На ерліфт висока температура не діє негативно, навпаки, частково використовуючи теплоту рідини, можна понизити витрату енергії на перекачування. При введенні повітря в гарячу рідину за рахунок різниці парціальних тисків відбувається випар води, збільшується об'єм газоподібної фази (повітря + пара), зростає підіймальна сила ерліфта і здійснювана ним робота. З підвищенням температури води ККД ерліфта підвищується.

Установка Салдінського заводу експлуатується з травня 1964 р. Вона надійна в роботі і має високі техніко-економічні показники. В порівнянні з ковшовим способом собівартість прибирання і переробки шлаку знизилася в 2,8 разу. З метою запобігання вибухам при попаданні чавуну витрата води складає 8—12 м3 на 1 т шлаку.

На доменній печі № 9 об'ємом 5000 м3 Криворізького металургійного комбінату за схемою, розробленою Всесоюзним науково-дослідним інститутом металургійної теплотехніки (ВНДІМТ), побудована і в 1975 р. введена в дію грануляційна установка з пнемогідротранспортом шлакової пульпи.

Грануляція на центральних установках в порівнянні з придоменною переробкою вимагає більше на 55% капітальних і на 44% експлуатаційних витрат.

Придоменна грануляція виключає перевезення вогненно-рідкого шлаку в ковшах і його втрати на утворення коржів і кірок, порушення термінів випуску чавуну і шлаку унаслідок затримки подачі шлаковозів, забезпечує безперервність надходження шлакового розплаву на переробку з температурою на 120—150°С вище, ніж на установки, розташовані за межами доменного цеху, що підвищує гідравлічну активність гранульованого шлаку.

Дослідженнями Південгідроцемента і Криворізького цементного заводу встановлено, що шлаки, що гранулюються за межами доменного цеху, містять скловидної фази не більше 75—80%, тоді як в шлаках придоменної грануляції вона досягає 92—98%. Це одна з причин більш високої гідравлічної активності шлаків придоменної грануляції.

Крім того, встановлено, що шлаковий пісок з установок придоменної грануляції відрізняється дрібнозернистістю і рівномірністю складу, має середній діаметр часток 1,02— 1,04 мм, а з установок, розташованих поза доменним цехом , — 2,1—3,8 мм (рис. 5).

Нижче приведені основні фізико-механічні характеристики доменних шлаків залежно від способу їх грануляції (Табл. 2 ).

У шлаках придоменної грануляції Криворізького металургійного комбінату фракції 2—10 мм відсутні, масова доля фракцій від 0,2 до 1 мм складає 85—95%; у шлаках, що гранулюються за межами цеху, масова доля таких фракцій відповідно складає 40 і 50— 55%. Тому гранульовані шлаки припічних установок вимагають менше витрат на помел, що вельми важливе, оскільки переважна більшість їх перед використанням піддається додатковому подрібненню.

На Криворізькому цементному заводі на основі шлаків придоменної та позадоменної грануляції були виготовлені партії шлакопортландцементу, що містять 48% шлаку, 48% клінкеру і 4% гіпсу. Питома поверхня цементів складала 3000 см2/г. В результаті встановлено, що при заміні шлаків, гранульованих поза доменним цехом, шлаками придоменної грануляції покращали техніко-економічні показники виробництва шлакопортландцементу:



1 - доменна піч; 2 - жолоб; 3 - чавунна лійка; 4 - ежекційний гранулятор шлаку; 5 - закритий жолоб для транспорту шлакопароводяної суміші; 6 - розширена частина закритого жолоба; 7 - бункер-сепаратор шлаку; 8 - аварійний переливний пристрій; 9 - труба для відведення пари; 10, 11 - труби для подачі гарячого повітря від доменних повітродувок; 12 - труба для відпрацьованого гарячого повітря; 13 - бункер для підсушки шлаку; 14 - переливний пристрій для відведення води через трубопровід; 15, 16 - сітка для розділення підсушеного шлаку від води, що відстоялася; 17 - засувка на водяній магістралі; 18 - бункер для підсушеного шлаку; 19 - секторний затвор; 20 - вагон для прийому шлаку; 21 - насадка ерліфта, що забезпечує подачу шлаку в бункер на .сушку; 22, - трубопровід для відведення гранул шлаку; 23 - насос для подачі води на грануляцію шлаку

Рисунок 4 - Придоменна грануляційна установка Салдінського заводу.

Таблиця 2 – Властивості шлаків залежно від способу грануляції

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Спосіб грануляції  | Масова доля фракцій 0—1,5 мм в шлаках, % | Об'ємнамаса, т/м3 | вологість, % |
|  Басейновий | 53,3—71,3 | 0,4—1,2 | 12—25 |
|  Жолобний | 57,6—72,4 | 0,6—1,5 | 15—30 |
| Барабанний | 59,4—61,3 | 0,5—1,3 | 5—15 |
| Гідроударний | 54;9—55,6 | 1,1—1,4 | 5—6 |
| Гідрожолобний | 62,5—76,9 | 0,8—1,3 | 7—20 |
|  Придоменний | 90,0 —96,9 | 1,2 | 6—7 |

* гідравлічна активність цементу підвищилася на 10%;
* продуктивність цементних млинів - на 11%;
* питома витрата електроенергії знизилася на 13%.

 Подібні показники мав Сухоложський цементний завод при використанні шлаків придоменної грануляції Салдінського металургійного заводу.

Таким чином, переробка вогненно-рідкого шлаку способом припічної грануляції вигідна як для металургійної, так і для цементної промисловості.



 *оп 1,0 2,о 3,о*

*Розмір сторони вічка*

1 — грануляція в басейні (Салдінський завод); 2 — грануляція гідрожолобна (завод ім. Серо­ва) ; 3, 4 .— придоменна грануляція (відповідно завод ім. Серова і Салдінський завод)

Рисунок 5 - Розмір часток шлаку, гранульованого різними способами

**Використання грануляційних вод.** Основна маса води після грануляції доменних шлаків використовується в оборотному водопостачанні.

Підвищити ефективність і комплексність переробки шлаків можна також за рахунок використання їх фізичної теплоти і сірчистих з'єднань. Встановлено, що в процесі грануляції доменних шлаків вода збагачується сірчистими і іншими мінеральними з'єднаннями і набуває лікувальних властивостей.

Багатолітня лікувальна практика підтверджує ефективність шлаководолікування і доцільність його подальшого розвитку при металургійних заводах.

По висновку Єкатеринбурзького науково-дослідного інституту курортології і фізіотерапії, вода, що поступає з грануляційних установок Нижньотагільського цементного заводу (шлак НТМК), по хімічному складу є сульфатно-хлоридно-кальцієво-натрієвою з мінералізацією 1,13 кг/м3, слаболужною (рН=8). Вміст сірководню в ній досягає 20 г/м3. По фізичній дії .на організм людини вона близька до сірчано-лужних вод типа п'ятигорських. Шлакова вода може бути додатково збагачена сірководнем до мацестинських стандартів шляхом додавання у ванну розчину сірчаної кислоти і сульфіду натрію.

Вживання шлакових вод для бальнеологічного лікування доцільно і з економічної точки зору.

**4.3 Використання доменних шлаків у виробництві цементів**

Цементна промисловість є основним споживачем доменних гранульованих шлаків. На виробництво цементу витрачається близько 72% гранульованих шлаків від їх загального випуску.

Гранульований шлак, використовуваний в цементній промисловості, замінює дорогий дефіцитний клінкер. При цьому економиться паливо і мінеральна сировина, що добувається в кар'єрах.

Маючи високу гідравлічну активність, гранульований шлак служить цінною мінеральною добавкою до портландцементу (до 15% маси портландцементу) і багатьом іншим видам цементів, а також є одним з основних компонентів шлакопортландцементу (до 60%).

Шлакопортландцемент — гідравлічна в’яжуча речовина, що твердне у воді і на повітрі, отримувана шляхом спільного або роздільного тонкого подрібнення клінкеру, гіпсу (до 5%) і гранульованого шлаку.

Згідно стандарту, масова .доля доменного гранульованого шлаку у шлакопортландцементі повинна складати не менше 30% і не більше 60%. У шлакопортландцементі, призначеному для вживання в масивних гідротехнічних спорудах, вміст шлаку встановлюється угодою зацікавлених сторін. Багато зарубіжних стандартів допускають добавку в шлакопортландцементі до 80% шлаку.

У СРСР випуск шлакопортландцементу займав друге місце в загальному виробництві цементу. У 1985 р. його доля від загального випуску цементу в цілому по країні складала близько 30% при середній марці отримуваного шлакопортландцементу 340. В цілому вживання доменного шлаку для виготовлення шлакопортландцементу значно покращує техніко-економічні показники цементної промисловості: паливно-енергетичні витрати на одиницю продукції знижуються на 20—25%, собівартість — на 25—30%.

Шлакопортландцемент широко застосовується для виготовлення бетонів; бетонних і залізобетонних виробів, при кам'яній кладці і як штукатурне в’яжуче. Бетони на основі шлакових цементів мають високу зносостійкість, невелику усадку при твердненні, підвищену довговічність, стійкість до сульфатної корозії і деяких інших хімічних дій. Із застосуванням шлакопортландцементу зведені гідроелектростанції на Дніпрі, Єнісеї та ін., він широко використовується для будівництва підприємств чорної металургії.

Довголітня практика вживання шлакопортландцементів в морських спорудах, греблях і каналах Бельгії показала їх високу стійкість до агресивної морської води. Шлакопортландцемент, що випускається в Бельгії, містить не менше 60% доменного гранульованого шлаку, вміст оксиду магнію не нормований (шлак, використовуваний в Україні, повинен містити не більше 20% MgO).

З бетонів на основі шлакопортландцементу зводяться масивні наземні і підводні споруди, злітно-посадочні смуги аеродромів і автомобільні дороги. Шлакопортландцемент є найдешевшою і найбільш доступною в’яжучою речовиною для виготовлення жаростійких бетонів. При його використанні відпадає потреба в меленому шамоті, спрощується і здешевлюється приготування жаростійкого бетону, покращується його якість.

Жаростійкий бетон на основі шлакопортландцементу має меншу усадку і більшу газопроникність, при різкому нагріванні менше руйнується.

Бетони на основі шлакопортландцементу не рекомендується застосовувати для виготовлення конструкцій і споруд, що піддаються навперемінному заморожуванню і відтаванню, зволоженню і висиханню. Звичайний шлакопортландцемент в початкові терміни схоплювання твердне повільно, але через 6—12 міс. міцність його наближається до міцності портландцементу і навіть перевершує його.

При виробництві портландцементу для тампонування свердловин, що горять, а також призначеного для бетонних покриттів автомобільних доріг, до складу цементу при його помелі вводять як активізуючу мінеральну добавку гранульований доменний шлак (до 15%), який підвищує зносостійкість бетону.

За своєю природою шлакопортландцемент більш солестійкий, ніж портландцемент, оскільки містить менше клінкеру, при твердненні якого виділяється гідроксид кальцію, який вступає в реакцію з солями, розчиненими в агресивних середовищах. Випробуванням бетонів, приготованих на швидкотвердіючому шлакопортландцементі нормованого складу у водах Азовського, Чорного морів, а також Кольської затоки, встановлена підвищена стійкість портландцементу проти дії сольових розчинів.

Організація виробництва шлакопортландцементу, особливо швидкотвердіючого, є крупним досягненням вітчизняних учених. Широке його вживання стало можливим завдяки дослідженням НДІцементу (м. Москва) і Південгіпроцементу (м. Харків), що дозволило усунути найбільш істотний недолік шлакопортландцементу - відносоно повільне тверднення, а за швидкістю наростання міцності зробити його рівноцінними портландцементу марки 400.

Перспективне вживання швидкотвердіючого високомарочного шлакопортландцементу у виробництві залізобетонних виробів з тепло-вологістною обробкою. При однакових витратах цементу на 1м3 бетону і водоцементному співвідношенні цикл тепловологістної обробки виробів, приготованих на швидкотвердіючому шлакопортландцементі, скорочується в середньому на 30%. Одночасно прискорюється оборотність форм, підвищується продуктивність праці.

Збільшення випуску шлакопортландцементу, особливо високомарочного, рівноцінно збільшенню загальних ресурсів цементу без додаткових капітальних витрат на виробництво клінкеру. Крім того, при будівництві цементного заводу з повним технологічним циклом вартість 1 т потужності, що вводиться, обходиться приблизно в 3 - 4 рази більше, ніж при будівництві сучасної грануляційної установки.

Особливо важливо розширювати виробництво швидкотвердіючого шлакопортландцементу, який на відміну від звичайного портландцементу має інтенсивніше наростання міцності в початковий період тверднення. Масова доля доменного гранульованого шлаку в швидкотвердіючому шлакопортландцементі повинна складати не менше 30% і не більше 50% маси цементу. Шлакопортландцементи діляться на марки: 200, 300, 400 і 500.

Дослідженнями Південгіпроцементу доведено, що при питомій поверхні часток цементу до 4000—5000 см2/г швидкотвердіючий шлакопортландцемент може бути настільки активний, що масову долю шлаків в нім можна довести до 50—60%. Тому розширювати його виробництво економічно вигідно. Встановлено також, що при двохстадійному помелі шлакопортландцементу і тоншому помелі клінкерного компонента можна отримувати швидкотвердіючий шлакопортландцемент, який по ряду важливих фізико-хімічних властивостей (менше тепловиділення, вища солестійкість, водостійкість і т. д.) перевершує портландцемент.

На основі доменного гранульованого шлаку виготовляються також інші шлакові цементи: сульфатношлаковий, вапняно-шлаковий і мурувальний.

Шлаковий магнезійний портландцемент - гідравлічна в’яжуча речовина, що твердне у воді і на повітрі, продукт спільного тонкого подрібнення магнезійного портландцементного клінкеру, що отримується на основі вапняно-магнезійних і глинистих порід, необхідної кількості .гіпсу і доменного гранульованого шлаку. Шлаковий магнезійний портландцемент також повинен містити доменного гранульованого шлаку не менше 30 і не більше 50% маси цементу. Шлаковий магнезійний портландцемент випускають трьох марок: 200, 300 і 400.

Вживання доменних шлаків в цементній промисловості вельми ефективно. Тому в перспективі основним споживачем гранульованих шлаків буде цементна промисловість.

На користь економіки гранульований шлак доцільно поставляти цементним заводам по прямим тривалим договірним зв'язкам, скорочуючи далекі і нераціональні перевезення. Економічно вигідно перевозити шлак на відстань до 500—600 км.

# **4.4 Матеріали і вироби з доменних шлаків**

#

# **Шлаковий щебінь.** Найпростіше переробляти рідкий доменний шлак на литий щебінь. Якість щебеня залежить від способу його виробництва. За рахунок управління швидкістю охолоджування шлакового розплаву з нього можна отримувати литий щебінь високої якості. Найбільш ефективне виробництво литого щебеня траншейним способом, який забезпечує однорідність і міцність матеріалу.

На Новолипецькому металургійному комбінаті (НЛМК) здобуття литого щебеня організоване наступним способом (рис. 6). З доменного цеху шлаковий розплав составами по 3—10 шлаковозів місткістю 16,5 м3 подається на ділянку виробництва щебеня, розташовану в безпосередній близькості від залізничних колій. Це дозволяє зливати розплав з ковшів в траншеї без вживання лотків. Перетини траншей мають форму трапеції (120...80×18...12× 2...3 м).

 Партію ковшів (5 шт.) зливають протягом 0,3—0,5 год. Після кожного зливу в траншеї утворюється шар шлаку завтовшки 8—10 см, що твердіє на повітрі протягом 0,3—0,5 год. Поверхню шлаку протягом 0,25—0,3 год. зрошують водою для зниження температури до 60—90°С. Швидке охолоджування запобігає зчепленню шарів шлаку, який під впливом температурної напруги розтріскується. Через 0,5 год. після повного випару води в ту ж траншею зливають нову партію шлаку. Кожен новий шар вогненнорідкого шлаку (з 5 ковшів), покриваючи попередній, охолоджений, частково робить його термічну обробку.

Пошарово залитий і добре охолоджений шлак є штучним каменем для виробництва щебеня. Розробка шлаку в траншеї ведеться екскаватором. У дробильно-сортувальне відділення шлак доставляється автомашинами. Рядовий несортований щебінь відправляють споживачеві безпосередньо з траншеї. Після вироблення шлаку траншею очищають від металевого скрапу. Підставу траншеї вирівнюють бульдозером.

Виробництво щебеня траншейним способом зважаючи на незначні витрати на його організацію і низьку собівартість високорентабельне.

Виробництво шлакового щебеня з ковшових залишків є технологічним завершенням повного використання шлаку. Кількість щебеня, що отримується цим способом, залежить в основному від тривалості перебування розплаву в ковші і, як правило, складає 25—30% загальної кількості шлаку, що поступає на переробку. Цей щебінь за якістю декілька поступається литому, але на більшості заводів він також відповідає вимогам стандартів на щебінь з доменного шлаку для бетону.

Схеми здобуття щебеня з відвальних доменних шлаків на різних заводах відрізняються лише різновидом існуючих дробильно-сортувальних установок. Зазвичай виробництвом щебеня з шлакових відвалів займаються місцеві будівельні організації і щебеневі заводи. Собівартість отримуваного щебеня в 2 рази нижча за собівартість щебеня, вироблюваного з гірських порід місцевих кам'яних кар'єрів; шлаковий пісок в 4 рази дешевший за пісок, що добувається з піщаних кар'єрів.

Отримуваний з доменних шлаків щебінь знаходить широке вживання у виробництві мінеральної вати, в промисловому, цивільному і дорожньому будівництві, замінюючи дорожчий щебінь з гірських порід. При дробленні щебеню з відвального доменного шлаку утворюється до 15—20% піску з об'ємною масою 1320—1370 кг/м3, який використовується при виготовленні бетону і залізобетону. У виробництві залізобетонних труб шлаковий пісок замінив звичайний пісок і дрібний щебінь, у виробництві гіпсошлакових прокатних перегородок — весь звичайний пісок. Щебінь і пісок з доменних шлаків застосовуються як заповнювачі в жаростійкому бетоні, замінюючи щебінь з бою шамотної цеглини, яка в три рази дорожче.

Відвальні доменні шлаки широко застосовуються для засипки фундаментів і під підлоги промислових будівель. Це скорочує трудомісткі роботи по ущільненню ґрунтів і забезпечує надійну експлуатацію полов без осідання і порушення підземних комунікацій, прискорює і здешевлює промислове будівництво.



1 — басейн для зливу шлаку; 2 — стрічковий конвеєр; 3 — самохідний бункер-живильник; 4 — екскаватор; 5 — грохот; 6 — магнітний шків; 7 — автопричіп для збору металу; 8 — щічна дробарка:; 9 — конвеєр з магнітним сепаратором; 10 — ротаційна дробарка; 11 — штабелі готової продукції (цифри в дужках — фракції щебеня, мм); 12 — бункер для дрібниці; 13 — лотковий затвор

 Рисунок 6 - Схема виробництва литого щебеня на НЛМК

З відвальних доменних шлаків комбінату «Запоріжсталь» щорік виробляється близько 1 млн. м3 фракціонованого щебеня. Вартість 1 м3 такого щебеня в два рази нижче за вартість щебеня з природних гірських порід.

Слід особливо підкреслити, що шлаковий щебінь в підставі доріг за рахунок гідравлічної активності дрібниці з часом цементується і перетворюється на міцну монолітну бетонну підкладку, що вельми вигідно відрізняє його від щебеня з гірських порід.

Таким чином, доменні шлаки відповідають всім вимогам заповнювачів для бетонів. Механічна міцність бетонів із шлаковим заповнювачем, особливо після витримки протягом 28 діб, вище, ніж з бетонів з природними заповнювачами.

Завдяки високій хімічній спорідненості шлакового щебеня з цементно-піщаним розчином його використання знижує витрату цементу на 10% в порівнянні з гранітним щебенем.

**Шлакова пемза.** Доменні рідкі шлаки є вихідною сировиною для виготовлення легкого пористого заповнювача — шлакової пемзи. Виробництво шлакової пемзи останніми роками досягло 55% її загального випуску в країні.

Шлак переробляється на шлакову пемзу чотирма способами. Перший спосіб — що траншейний-бризкальний (завод «Азовсталь»). За цим способом пемзу отримують наступним образом. Вогненно-рідкий шлак з шлаковозного ковша зливають в траншею під водяний струмінь тиском 0,6 МПа. Остаточно спучений шлак, що закристалізувався в траншеї, протягом 1,5—2,0 год. поливають водою, потім на вологу поверхню зливають наступну порцію шлаку.

Після охолоджування шлаку пемзу розробляють екскаватором і системою конвеєрів подають у відділення дроблення. Шматки і глиби пемзи поступають в щічні дробарки. Після первинного дроблення шлакова пемза поступає на віброгрохот для розсівання. Продукт фракції 0—40 мм подається в бункер, шматки більше 40 мм піддаються додатковому подрібненню у валковій дробарці. Після вторинного дроблення шлакова пемза поступає на конвеєр, куди подається пемза, що пройшла через віброгрохот, фракції 0—40 мм. В результаті грохочення отримують пемзовий пісок фракції 0 - 5 мм і пемзу фракцій 5—20 і 20—40 мм. Всі фракції поступають на відкритий склад готової продукції, звідки відвантажуються споживачам.

Застосовуються також наступні способи виробництва пемзи: водоструминний (трест «Магнітострой», НТМК); у перекидному басейні (Челябінський металургійний комбінат); гідроекранний (Череповецкий і Криворізький металургійні комбінати).

Багатолітній досвід роботи заводу «Азовсталь» показав, що траншейно-бризкальний спосіб, є найбільш простим, надійним в експлуатації і дозволяє отримувати найдешевшу пемзу.

Як показали роботи УралНДІЧМ, введення в потік технологічної води незначної кількості вапняної муки дозволяє інтенсифікувати процес спучення. При цьому об'ємна густина пемзи знижується з 750—900 до 510— 560 кг/м3.

Шлакова пемза — найдешевший пористий заповнювач для виготовлення теплоізоляційних, конструктивно-теплоізоляційних і конструктивних легкобетонних виробів, а також для засипок. Бетон на шлаковій пемзі на 20—30% менш теплопровідний, чим інші бетони з такою ж об'ємною масою. Потреба в пористому шлаковому заповнювачі велика і з кожним роком зростатиме. Навіть максимальна собівартість шлакової пемзи в 2—3 рази менша, ніж інших пористих заповнювачів.

На основі шлакової пемзи виготовляють шлакопемзобетони марок 150, 200 і 300, вартість панелей з яких на 10— 13% нижче, ніж з керамзитобетону і гранітного щебеня.

Таким чином, вживання шлакової пемзи економічне і її виробництво доцільно розвивати у всіх металургійних районах, де доменний шлак по своєму хімічному складу придатний для виробництва високоякісної пемзи.

Для виробництва шлакової пемзи придатні практично всі не схильні до силікатного розпаду доменні шлаки. Шлаки, що піддаються силікатному розпаду, необхідно заздалегідь піддавати кристалохімічній стабілізації, наприклад, вводити в них близько 0,3% апатитового концентрату. Найбільш придатними для виробництва шлакової пемзи є доменні шлаки з температурою плавлення не нижче 1250°С і в'язкістю не більше 500 Па·с наступного хімічного складу %: SiO2 — більше 35; СаО — не більше 43,6; А12О3 - 8... 18; (MnO+ FеO) — не більше 3.

**Мінеральна вата.** Мінеральна вата є волокнистим матеріалом, що виробляється з силікатного розплаву шлаків, гірських порід і їх сумішей. Вона знаходить широке вживання у виробництві теплоізоляційних матеріалів. Так, останніми роками на основі мінеральної вати виготовляється понад 50% всіх теплоізоляційних матеріалів і виробів з них, призначених для ізоляції поверхонь, що нагріваються до 700°С. Мінеральна вата - негорючий матеріал; він значно довговічніший в порівнянні з іншими теплозвукоізоляційними виробами.

Згідно стандарту, мінеральна вата в залежності від величини об'ємної маси виготовляється трьох марок: 75, 100, 125. Вологість вати повинна складати не більше 2%. Масова доля сірки — не більше 1%, модуль кислотності (відношення суми мас оксидів кремнію і алюмінію до суми мас оксидів кальцію і магнію) — не більше 1,2.

 Основною сировиною для виробництва мінеральної вати є кислі і нейтральні доменні шлаки і деякі шлаки кольорової металургії. Використання доменних шлаків забезпечує меншу витрату коксу і більшу продуктивність вагранок, чим переплавка гірських порід.

Продуктивність вагранок, що працюють на металургійних шлаках і інших відходах промисловості, складає близько 1900 кг/год., а на природній сировині — 1530 кг/год.

 Витрати умовного палива на здобуття 1 т продукції з рідких шлаків в 4—7 разів нижче, ніж при плавленні сировини з гірських порід у вагранках і ванних печах. Собівартість 1м3 мінеральної вати з рідкого доменного шлаку нижче в порівнянні з ватою з шлакового щебеня в 3 рази, з ватою із гірських порід - в 4 рази.

Проте, не дивлячись на економічність використання доменних шлаків, виробництво мінеральної вати із застосуванням цього виду сировини розвинене недостатньо. В даний час мінеральна вата з первинних доменних розплавів виробляється лише на базі металургійних заводів «Азовсталь», «Криворіжсталь» і Донецького. Проте якість її недостатньо висока унаслідок того, що шлаки металургійних заводів України мають високу основність і підвищений вміст сірки.

 **Шлакове литво.** Шлакове литво є ефективним штучним кристалічним матеріалом, що формується з розплаву з подальшою кристалізацією і термообробкою. Вироби з шлакового литва мають ряд цінних властивостей: високою абразивною і хімічною стійкістю, механічною міцністю, діелектрічністю, жароміцністю і малим водопоглинанням. Для виробництва литва придатні кислі і нейтральні доменні шлаки.

По ефективності виробництва шлакове литво займає на металургійних заводах друге місце після минераловатних виробів. В даний час розроблені теоретичні основи технології масового виробництва литих шлакових виробів. Проте через відсутність надійних конструктивних рішень, що механізують процес виробництва, зокрема, дорожньої брущатки, їх здобуття ведеться трудомістким полігонним способом.

Єство його полягає в тому, що дно спеціальної ями засипається подрібненим шлаком. Потім в ямі встановлюють розбірні металеві форми по розмірах вироблюваної брущатки. Форми покривають пластинами, між якими залишають щілини шириною 10—15 мм. Через ці щілини форми заповнюють шлаковим розплавом. На покривні пластини укладають вантаж щоб уникнути зсуву їх струменем рідкого шлаку в період заповнення форм. Злив шлаку продовжують до тих пір, поки над формами не буде створений теплоізоляційний покривний шар завтовшки 10—15 см, за рахунок теплоти якого досягається кристалізація і термічна обробка виробів.

Після охолоджування відливання до температури 80—100°С| теплоізоляційний шар прибирають. Розбирання форм і вивантаження готової брущатки в спеціальні контейнери виробляється уручну.

Виробництво брущатки полігонним способом на двох підприємствах характеризується наступними даними (табл. 3).

Таблиця 3 - Порівняльні дані по виробництву шлакової брущатки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Показники | НТМК | Чусовський металургійний завод |
| Розмір отримуваної брущатки, мм. | 160×160×120  | 120×120×180  |
| Маса брущатки, кг | 8 | 5,8 |
| Кількість ям для виробництвабрущатки, шт. | 108 | 130 |
| Виробництво брущатки, млн. шт./ рік | 1,97 | 5,4 |

Лита брущатка має високу міцність і успішно використовується при будівництві автомобільних доріг і полов промислових будівель. Термін служби доріг, покритих брущаткою, більше, ніж асфальтованих і цементно-бетонних. У експлуатації вони дешевше за інші дороги з штучним покриттям.

В УралНДІбудпроєкті розроблений і запатентований у ряді країн спосіб виготовлення металошлакових литих труб, по якому в кокіль, що обертається, заливається спочатку рідкий чавун, а потім шлаковий розплав. Отримана труба має зовнішню оболонку з металу, а внутрішню — зі шлаку завтовшки 12—15 мм. Випробування показали, що довговічність металошлакових труб в 6—7 разів вище сталевих, і підтвердили доцільність виробництва і вживання таких труб для транспортування абразивних матеріалів..

Шлакове литво частково може замінювати кам'яне, потреба в якому дуже велика. Оскільки шлакове литво має крупнокристалічною і нерівномірною структурою, що погіршує його фізико-хімічні характеристики, з нього рекомендується відливати вироби невеликих розмірів і прості по конфігурації.

**Шлакоситали.** Шлакоситал — конструкційний і обробний керамічний матеріал, що має рідке поєднання якостей: від скла (аморфного тіла) він відрізняється кристалічною будовою, а від керамічних матеріалів — тоншою мікрокристалічною структурою. Шлакоситал легше за алюміній, має значну хімічну і термічну стійкість, високу міцність на вигин, стискування і стирання, є гарним діелектриком.

У ряді агрегатів він може замінювати чавун, сталь, кольорові метали, скло, кераміку, фарфор, бетон, кам'яне литво, мармур, граніт і інші натуральні камені, а також дерево. Вироби з ситалу міцні, красиві і не дорожче за кераміку. На них можна наносити шар кольорової глазурі. Ударна в'язкість шлакоситалів в 3—4 рази вища, ніж стекла, вони стійки в сірчаній кислоті, не поглинають воду і можуть працювати при температурах до 750°С.

Виробництво шлакоситалів в основному аналогічно виробництву скла. Доменний гранульований шлак сплавляється в стаціонарній печі з кварцовим піском і глиною в скломасу, як каталізатори кристалізації служать Na2SO4, Na3AlF6, а також оксиди і сульфіди ряду металів — Сг, Ti, Mn, Fe, Zn і ін. Оксиди металів додають шлакоситалам різне забарвлення.

Зварену в печі скломасу формують у вигляді безперервної стрічки завтовшки 10 мм на прокатній машині. Термообробку скляної стрічки проводять на роликовому конвеєрі кристалізатора. Пресовані штучні вироби одержують аналогічно виробам із скла з подальшою кристалізацією в печах з рухомим черенем. Після формування виробу охолоджують до 700°С і витримують при цій температурі протягом часу, необхідного для завершення процесів утворення центрів кристалізації. Потім температуру підвищують до 930—980°С (тобто до температури кристалізації основної фази шлакоситала — волластоніту) і підтримують її протягом 2—2,5 год. до повного завершення процесу, після чого вироби охолоджують.

По своїх фізико-механічних і хімічних властивостях шлакоситали перевершують кам'яне литво, кислототривку кераміку, фарфор і природні камені. Міцність шлакоситалу на вигин більша, ніж скла, фарфору, кераміки, кам'яного литва, і наближається до міцності чавуну. Шлакоситали в 3 рази легше за чавун і сталь. Щільна дрібнокристалічна структура шлакоситалів визначає їх високу стійкість до стирання: у 4—8 разів більше, ніж кам'яного литва, в 20—30 разів, чим граніту і мармуру, і .в 35 разів, чим фарфору. Шлакоситали морозостійкі, оскільки мають нульове водопоглинання. По хімічній стійкості до кислот і лугів шлакоситали не поступаються кам'яному литву, кераміці і фарфору і часто застосовуються як антикорозійний захист.

Використання доменних шлаків для виготовлення шлакоситалу, а також організація його виробництва методом потокової механізованої скляної технології зумовили порівняно низьку собівартість шлакоситалових виробів і високу ефективність їх вживання.

 **5 Використання сталеплавильних шлаків**

**Способи обробки шлаків.**Питомий вихід сталеплавильних шлаків складає 120—250 кг/т для мартенівського процесу, 60—120 кг/т для електросталеплавильного і 150—200 кг/т — для киснево-конвертерного В середньому вихід сталеплавильних шлаків складає 158 кг на 1 т стали.

Основна маса шлаків в Україні утворюється в Донецько-Придніпровському економічному районі. Країна має в своєму розпорядженні великі ресурси сталеплавильних шлаків, які доки використовуються незадовільно.

Тим часом сталеплавильні шлаки є важливим джерелом здобуття вторинного металу, залізофлюсу для вагранок і аглодоменного виробництва, щебеня для дорожнього і промислового будівництва, а також вапняних добрив для сільського господарства.

Мартенівські шлаки періоду плавлення (первинні шлаки) містять до 75% (SiO2+CaO+FeO). Вони характеризуються підвищеним вмістом МnО (до 12%) та FeO (до 15—28%).

Кінцеві шлаки при нормальному веденні процесу зазвичай містять при виплавці низковуглецевих сталей 60% (СаО+MgO+MnO) та 32% (SiO2+P2O5+Fe0заг.), а при виплавці вуглецевих сталей відповідно 65% та 35%. Ці шлаки відрізняються високою основністю (2,0—4,3).

Основними мінералами мартенівських шлаків є двохкальцієвий і трьохкальцієвий силікати. При основності шлаку до 3,0 переважає двохкальцієвий, при основності більше 3,0 — трьохкальцієвий силікат.

Кислі мартенівські шлаки збагачені кремнеземом до 42—58%, тому в них спостерігається значна кількість скло видної фази. Вихід їх складає близько 1 % загальної кількості мартенівських шлаків.

Електросталеплавильні шлаки окислювального періоду подібні до первинних мартенівських шлаків і мають основність 1,5 – 2,9.

1,5—2,9. Відновні шлаки підрозділяються на білі, карбідні і магнезійно-глиноземисті. Білі шлаки наводяться при виплавці сталей з масовою долею вуглецю <0,35%, карбідні — при виплавці середньо- і високовуглецевих сталей, магнезійно-глиноземисті — при виплавці неіржавіючих сталей.

По мінералогічному складу електросталеплавильні шлаки аналогічні основним мартенівським. У зв'язку з тим, що в електросталеплавильних шлаках майже повністю відсутні оксиди заліза, марганцю і хрому, феритна і оксидні фази в них майже не зустрічаються.

Киснево-конвертерні шлаки містять %: СаО — 50... 60; SiO2—14; FeO—8...16; MgO—4...11; вони мають основність до 4,5.

Деякі види сталеплавильних шлаків схильні до мимовільного силікатного, залізистого, вапняного або марганцевистого розпаду. Силікатний розпад обумовлений поліморфним перетворенням ортосилікату кальцію (2CaO·SiO2), що має чотири модифікації. Перехід фази ортосилікату кальцію з однієї модифікації в іншу супроводжується перебудовою кристалічної решітки, зміною густини і об'єму шлаку. Максимальний (на 10—12%) приріст об'єму решітки відбувається при переході β-фази в γ-фазу, що. викликає силікатний розпад металургійних шлаків.

Марганцевистий і залізистий розпади шлаків відбуваються унаслідок гідратації сульфатів марганцю і заліза під впливом атмосферної вологи. Утворення Fe(ОН)2 супроводжується збільшенням об'єму на 38%, а утворення Мn(ОН)2 — на .24% і приводить до руйнування шлаку.

Розпад спостерігається при масовій долі в шлаках (FеO +МnО) більше 3 % і сульфатної сірки — понад 1%.

Магнезійний і вапняний розпади відбуваються унаслідок гідратації вільного вапна або магнезії, що супроводжується збільшенням об'єму.

Електропічні шлаки рафінувального періоду плавки, що утворюються при виплавці легованих сталей, мають високий вміст оксиду кальцію (близько 60%) і при охолоджуванні розпадаються, перетворюючись на тонкодисперсний порошок.

У кускових мартенівських і основних конвертерних шлаках зустрічаються включення вільного СаО, який, сприяючи збільшенню об'єму шлаку, викликає його прискорене руйнування.

**Використання шлаків в металургії. .**Сталеплавильні шлаки в шихті доменних печей застосовують в Україні завод ім. Петровського, «Запоріжсталь», «Криворіжсталь». На Криворізькому металургійному комбінаті проведені дослідні плавки з метою використання конвертерних шлаків власного виробництва в доменних печах. Досліди показали, що введення 1 т шлаку, що містить 474 :кг СаО, 178 кг SiO2, 35 кг MgO, 16,6 кг FеO, 64 кг МnО, дозволило понизити витрату вапняку на 180 кг, агломерату на 307 кг, марганцевої руди на 14,5 кг і коксу на 71,3 кг**.**

На заводі ім. Петровського в шихті доменних печей широко застосовують конвертерні шлаки власного виробництва. Введення в шихту конвертерного шлаку в кількості 46 кг/т чавуну поліпшило техніко-економічні показники доменної плавки: скоротило витрату марганцевої руди, агломерату, вапняку. Вживання конвертерного шлаку сприяло поліпшенню шлакового режиму, підвищенню газопроникності шихти і скороченню витрати через повітряні і шлакові фурми, а також простоїв при заміні фурм.

Сталеплавильні шлаки застосовують і при агломерації При цьому повністю використовуються корисні компоненти, що містяться в шлаках. Досліди по вживанню в шихті відвального сталеплавильного шлаку фракції 0—10 мм, проведені на аглофабриці «Криворіжсталі», показали; що хімічний склад агломерату з введенням в шихту шлаку практично не змінився, зате збільшилася продуктивність агломашин в результаті підвищення газопроникності шихти, скоротилася витрата залізняку і вапняку.

Шлак поточного виробництва, що містить підвищену кількість СаО і MgO, має більшу флюсуючу здатність, тому економічний ефект використання його в аглошихті буде значно вище.

У металургії, окрім агломераційного і доменного процесів, сталеплавильні шлаки з успіхом застосовуються також в шихті для вагранкових печей. Досвід металургійних підприємств показує, що вживання сталеплавильних шлаків замість вапняку має наступні переваги: унаслідок поліпшення теплового балансу плавки температура чавуну і шлаку підвищується на 20—25°С, при цьому вагранковий: шлак стає більш рідкорухливим, легко віддаляється і обробляється; абсолютно усувається утворення настилів над фурмами, чим забезпечується рівний хід плавки. Полегшується ремонт вагранки; приблизно на 50% зменшуються втрати чавуну з шлаком, оскільки в разі рідкорухливого шлаку відбувається краще розділення продуктів плавки. Крім того, в чавун відновлюється значна частина оксидів заліза і частково марганцю з шлаку. Наявність у шлаку корольків заліза також сприяє підвищенню виходу рідкого чавуну.

Високий вміст в сталеплавильних шлаках оксидів марганцю забезпечує зниження масової долі сірки в чавуні на 15—20%, яка виводиться з процесу з вагранковим шлаком у вигляді MnS.

Доцільно всім металургійним і машинобудівним заводам, що мають мартенівське або конвертерне виробництво, організувати оброблення і постачання сталеплавильного шлаку для розташованих поблизу чавуноливарних цехів.

Мартенівський і конвертерний шлаки слід розглядати не як замінник вапняку, а як флюс, що має більш коштовні властивості, ніж вапняк.. Не дивлячись на ряд переваг електричних печей в порівнянні з вагранками, останні ще тривалий час залишаться основними плавильними агрегатами для здобуття рідкого чавуну в потужних ливарних цехах.

**Використання шлаків в будівництві.** Найбільш ефективним напрямом використання сталеплавильних шлаків є переробка їх на щебінь для дорожнього будівництва.

Основним будівельним матеріалом для автомобільних доріг служить в даний час природний щебінь. Шлаковий щебінь в два рази дешевше природного, а капітальні вкладення в організацію виробництва його на базі шлакових відвалів в три рази, менше, ніж будівництво кар'єру з щебеневим заводом такої ж потужності. Крім того, в багатьох економічних районах майже немає родовищ каменя для виробництва щебеня, і дорожні організації перевозять його на велику відстань.

Велику частину каменя, що переробляється на щебінь, складають вапнякові породи, ефективним замінником яких можуть бути сталеплавильні шлаки, по ряду властивостей не поступливі, а інколи і перевершуючи навіть щебінь твердих порід. Сталеплавильний шлак завдяки шорсткій .поверхні легше ущільнюється і подрібнюється в процесі укочування, здатний цементуватися і утворювати міцну монолітну основу. Досить міцні основи виходять з суміші активного шлакового щебеня і щебеня із слабких вапняків. Щебінь з мартенівських шлаків з успіхом застосовується для заклинки підстав з гранітного щебеня, що важко піддається укочуванню.

Особливістю асфальтобетонних покриттів виготовлених із застосуванням сталеплавильних шлаків, є відсутність деформації зрушення навіть при інтенсивному русі важкого транспорту.

Улаштування дорожнього одягу із застосуванням відвальних сталеплавильних шлаків набуло особливо широкого поширення в Україні. Тут економію складають різниця в оптових цінах взаємозамінних матеріалів, скорочення транспортних витрат і витрат на укочування (витрати на укочування шлакового щебеня в середньому на 30% менше, ніж природного). Крім того, завдяки кращій ущільненості шлакового щебеня можливе зменшення товщини дорожніх покриттів, що означає і скорочення кількості щебеня, що укладається в 1 км. дороги.

Велика механічна міцність і активність шлакового щебеня в порівнянні з традиційними матеріалами сприятимуть подовженню терміну служби доріг і зниженню витрат на їх ремонт.

 **6 ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАМІВ**

Технологічні гази, що відходять, багатьох металургійних виробництв підлягають очищенню в апаратах, як правило, мокрого типу. При цьому утворюється шлам – суспензія твердих часток у воді. Шлами виробництв металургії містять оксиди заліза: сталеплавильний шлам – 84...88%, доменний шлам – 59...63%, червоний шлам виробництва глинозему способом Байєра – 45%, сухим способом – 38%.

Ці залізовмісні шлами можна використовувати у чорної металургії. Збезводнений до 8% шлам додається у шихту агломераційного виробництва. Щоб застосовувати шлам як сировину безпосередньо у сталеплавильному процесі, його треба оґрудкувати. До шламу додається сполучна речовина, наприклад, бентоніт. Із отриманої суміші робляться окатиші, які потім випалюються для надання їм міцності. Ці окатиші служать сировиною для виправлення сталі у мартенівських чи електродугових печах.

Запорізьким індустріальним інститутом (тепер ЗДІА) був розроблений комплексний спосіб утилізації шламів сталеплавильного, доменного та глиноземного виробництв. При відновленому переплавленні суміші трьох шламів утворюються два продукти – сталь і шлак. Останній, у залежності від змісту в ньому глинозему використовується в алюмінієвому виробництві або у виробництві цементу. Якщо у шлаку 25...30% А12О3 (високоглиноземний шлак), він застосовується на Запорізькому алюмінієвому комбінаті для виробництва глинозему. Якщо шлак містить 4...8% А12О3 (глиноземний шлак), його використовують як добавку у клінкер портландцементу. Склад другого компоненту, кремністої сталі: С – 0,36%; Si – 2,34%; Cr – 0,24%; V – 0,15%. Така сталь стійка проти тертя, добре тримає мастило, зберігає твердість при високих температурах, має високі межі міцності, текучості і утомленості.

Інші шляхи утилізації залізовмісних шламів – корегуюча добавка у виробництві цементу; фарбувальна добавка у виробництві кольорових цементів; добавка до сировини у виробництві червоної цегли; виробництво барвників.

  **7 УТИЛІЗАЦІЯ ОКАЛИНИ ПРОКАТНИХ ЦЕХІВ**

У прокатному виробництві одним з відходів є окалина, яка утворюється при окисленні гарячої поверхні слябів, блюмів, заготівок. Склад окалини комбінату “Запоріжсталь”: FeO – 90%; Fe3O4 – 5…10%; Fe2O3 – 0…5%. Окалина, забруднена мастилами (мастильно-охолоджувальними рідинами – МОР), що застосовуються при прокатці, видаляється з поверхні металу гідрозбивом і потрапляє у відстійники. Стічні води, забруднені окалиною і мастилами є основним відходом прокатного виробництва. Вміст окалини у воді коливається у широких межах – 50…5000 г/м3. Вміст мастил у воді складає 20…200 /м3 [1].

Хімічний і гранулометричний склад окалини ПАТ «МК Запоріжсталь» наведений у таблицях 4 і 5.

Таблиця 4 – Хімічний склад окалини

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Компонент | Feзаг. | Mn | SiO2 | Al2O3 | CaO | MgO | K2O | Na2O | Cr2O3 | P | S |
| Мас. % | 74,6 | 1,72 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,46 | 0,07 | 0,14 |

Таблиця 5 – Гранулометричний склад окалини

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Розмірчастинок,мм | >10 | 10…5 | 5…2,5 | 2,5…1,6 | 1,6…0,8 | 0,8…0,4 | <0,4 |
| Мас. % | 13,7 | 19,5 | 25,5 | 11,2 | 16,7 | 8,6 | 4,3 |

У первинних відстійниках (ямах для окалини), що розраховуються на 1,5…2-хвилинне перебування в них стічної води вловлюється в основному велика окалина. Ці відстійники зазвичай розташовуються безпосередньо в цеху і мають прямокутну в плані форму. Після грубої очистки стічна вода самопливом або через насосну станцію подається на вторинні відстійники, як правило, горизонтальні. Кожна секція відстійника в плані має розміри 6×18 м. Вторинні відстійники розраховуються на тривалий час перебування води в них, і тому при значних кількостях стічних вод займають великі площі.

Відстійник містить корпус, розташовану в ньому шахту для прийому окалиновмісних стічних вод, накопичення окалини і її видалення транспортуючим механізмом - грейфером, кільцеву камеру між корпусом і зазначеної шахтою, лоток для надходження окалиновмісних стічних вод в шахту, систему відводу освітленої води і бункер для зневоднення окалини.

Лоток для надходження окалиновмісних стічних вод розташований тангенціально по відношенню до шахти.

Для відділення окалини від мастил до води додають поверхнево активні речовини (ПАР), що зменшують поверхневий натяг рідини. При цьому окалина набуває здібність не змочуватися мастилами. Концентрація ПАР у стічних водах повинна складати 120…130 г/м3. Гідрофілізація окалини (тобто надбання властивості змочуватися водою, а не мастилами) і розділення компонентів у системі вода – окалина – мастила за допомогою ПАР дозволяють отримати не забруднений мастилами шлам дрібнодисперсної окалини, що годиться для використання. Застосування ПАР на ПАТ «МК Запоріжсталь» дозволило знизити вміст мастил в окалині до 3%, тоді коли без обробки ПАР окалина містила до 15% мастил [1].

Прикладом ПАР можуть служити звичайне мило (суміш натрієвих солей жирних карбонових кислот - олеата, стеарата натрію тощо) і СМЗ (синтетичні миючі засоби), а також спирти, карбонові кислоти, аміни і т. п. До ПАР відносяться алкоксилати, алкілглікозиди, карбоксиетоксилати, фосфати і поліфрсфати, сульфосукцинати, алкілсульфати, алкілефіросульфати та ін.

Мастила, після відділення від окалини і води, можуть використовуватися як паливо. З цією метою вони направляються до заводського мазутосховища.

Після осідання у відстійниках окалину висушують у бункерах зневоднення, у центрифугах, вакуум-фільтрах або фільтр-пресах. Іноді застосовується термічна сушка.

Застосування фільтр-пресу типу ФПАКМ (рис. 7) і центрифуги ефективно при зневодненні дрібнодисперсної окалини з масовою долею мастил до 3%.

У теперішній час найбільш розповсюдженою схемою підготовки окалини до використовування є сушка в бункерах зневоднення і центрифугах. Вважається,



І – фільтрування; ІІ – віджимання; ІІІ – вивантаження осаду; А – відведення фільтрату; В – подача суспензії, промислової рідини та повітря; С – подача води на діафрагму

1- фільтрувальні плити. 2 - стійка; 3-верхня опорна плита; 4-колектор відводу; 5 - колектор подачі; 6 - пристрій натягування; 7 -фільтрувальна тканина; 8 - приводний пристрій: 9 - камера регенерації; 10 - транспортер; 11 - нижня опорна плита; 12-електромеханічний затискач; 13-притискна плита; 14 – ролики; 15-ніж для знімання осаду; 16 - ущільнювальний шланг; 17 - рамка; 18 - плита; 19- перфорований лист; 20 - спіралі; 21 - діафрагма; 2.2 - дренажна трубка.

Рисунок 7 - Автоматичний фільтр-прес ФПАКМ (а); проміжні фільтрувальні плити до нього (б)

що взимку доцільно проводити зневоднення у центрифугах, а в інші періоди – у бункерах.

Бункер зневоднення – бетонна ємність трапецеїдального перетину (рис. 8). Стінки бункеру виконані із залізобетонних пліт, що обкладені сталевими листами товщиною 6 мм. Всередині залізобетонних стін прокладені труби, по яким у холодну пору року пускають водяну пару (парова сорочка).

По дну бункеру прокладають дренажні трубопроводи, з виходом цих трубопроводів в торцеві дренажні кишені бункера. Над дренажем лежать металеві листи з уклоном усередину 0,02, закріплені на двотаврах [1].

За іншим варіантом дренажні трубопроводи з щілинними отворами засипаються шаром вуглецевмісного матеріалу, наприклад коксової дрібницею, на висоту 600-1000 мм. Цей шар виконує наступні функції: фільтруючого матеріалу, дренажного шару, підтримуючого шару, шару, що перешкоджає проникненню окалини на дно бункера. Крім того, коксовий дріб'язок, використовуваний для зневоднення, виступає в ролі сорбенту нафтопродуктів, беручи участь в реакції хемосорбції.

Ємність бункерів зневоднення розраховується на кількість окалини, що утворюється протягом 2…3 діб.

Зниження вмісту вологості до 10-12% перешкоджає змерзанню окалини в холодну пору року, а це дає можливість вести роботи по підготовці до утилізації замасленої окалини практично протягом усього року. Зниження вмісту вологи сприятливо позначиться і на наступних стадіях переробки.

Підготовлену окалину додають до агломераційної шихти. При цьому масова частка води в окалині повинна бути не більш 8...10%, розмір частинок – не більш 5 мм, а кількість мастил допускається така, щоб загальний їх вміст у аглошихті не перебільшував 1 кг на 1 т отриманого агломерату.



1 – залізобетонна плита; 2 – парова сорочка; 3 – металевий лист; 4 – окалина;

5 – дренажна система; 6 – відведення води

 Рисунок 8 – Бункер зневоднення

Відомі також способи підготовки до переробки замасленої окалини, що включають в себе пірометалургічні процеси. Наприклад, такі, де окалину нагрівають до повного видалення вологи і масла у вигляді парогазової суміші. Потім окалину змішують з рідким шлаком і отриману суміш вводять в агломераційну шихту. Але цій спосіб потребує великих витрат енергії.

 **8 ПРЯМИЙ СПОСІБ ВИПЛАВЛЯННЯ СТАЛІ**

В даний час 98% сталі виробляється за єдиною схемою: агломерація — доменна плавка — здобуття стали (у конвертері або мартенівській печі). Основна кількість шкідливих викидів виділяється на стадії підготовки сировини до плавки, а саме на переділі агломерації: 30—40% пилу, 60—65% СО і 80—85% SO2.

Відомо, що найбільші резерви в зниженні виходу шкідливих речовин і зменшенні витрат на їх знешкодження приховані у вдосконаленні технологічного процесу.

Останніми роками в індустріально розвинених країнах велися пошуки прямого, позадоменного способу здобуття стали, мінуючи три найбільш важких в екологічному відношенні переробки — агломерацію, доменну плавку і коксування вугілля.

Апаратурно-технологічне оформлення цього способу в різних країнах декілька розрізняється, але у всіх випадках зберігається його основа — попереднє відновлення залізорудної сировини (металізація) і його подальша плавка в дугових сталеплавильних печах.

Цей спосіб має ряд принципових достоїнств:

1. дозволяє скоротити традиційну схему здобуття стали;
2. дає можливість отримувати сталь без використання дорогого і дефіцитного коксу;
3. знижує кількість шкідливих викидів і полегшує їх знешкодження.

Капіталовкладення на виробництво 1 т стали в рік на металургійних заводах продуктивністю до 2 млн т в рік виходять значно вищими, якщо завод споруджується за класичною схемою: агломерація — доменна плавка — конвертація. Схема «відновлення газом — електропіч» виявляється особливо ефективною для заводів, на яких потрібно отримувати всього 400—600 тис. т стали в рік.

У колишньому СРСР безкоксовий спосіб здобуття сталі освоєний на Оскольському електрометалургійному комбінаті (ОЕМК) потужністю 4,3 млн. т стали в рік.

Комбінат розташований в центрі КМА (у 20 км. від р. Старий Оскол Білгородської обл.). Окрім надійної сировинної бази тут є магістралі газопроводів, електростанції, пов'язані з єдиною енергетичною системою, близько розташовані споживачі металу промислових .городов України, Росії, Білорусі і Молдови.

Залізорудний концентрат з Лебединського ГЗК подається на комбінат гідротранспортом. Трубопровідний транспорт твердих матеріалів в порівнянні з залізничним має ряд переваг: він не залежить від погодних умов, займає менше площі, екологічний, високопродуктивний. Ресурс труб складає 20 років, тоді як рейки при інтенсивному русі поїздів необхідно замінювати через 7—10 років.

При масовій долі твердого в пульпі 50...51% (13...17% за об'ємом), гідротранспорт здійснює транспортування із швидкістю 1,3...1,4 м/с.

Трубопроводи виконані з безшовних труб із сталі марки Х-60 з поліетиленовим покриттям зсередини завтовшки 5 мм. Товщина стінки - 14,2мм.

На ОЕМК залізорудна пульпа поступає в згущувачі: діаметром 55 м. Зі згущувача пульпа передається в два з′єднаних один з одним резервуару-сховища, де за допомогою мішалок підтримується у зваженому стані. Зі сховищ вона насосом перекачується в розподільники, звідки самопливом поступає в дисковий вакуум-фільтр.

Дискові вакуум-фільтри служать для обезводнення пульпи і здобуття кека з вологістю 9—10%, достатньою для виготовлення сирих окатишів необхідної якості. Кек, скинутий з фільтрів, після додавання бентоніту доставляється системою конвеєрів спочатку в змішувачі, а потім в бункери перед огрудковувачами.

Бентоніт, який виробляють з грудкової глини на спеціальній фабриці, подають гідротранспортом в бункер відділення грудкування. Потім задану кількість подають на конвеєр.

Кек і бентоніт перемішують в безперервно працюючому прохідному змішувачі, потім шихта через ваговий дозатор подається стрічковим конвеєром в барабанний огрудковувач, де при добавці води формують окатиші різного розміру.

Грохот, встановлений за барабаном, розділяє окатиші на фракції. Фракція 8...25 мм, як готовий продукт, подається на збірний конвеєр.

Сирі окатиші подаються для зміцнення на обпалювальну машину. Окатиші проходять на обпалювальних візках під різними зонтами, що перекривають всю довжину обпалювальної машини По довжині машини розташовуються наступні технологічні зони, м:

Сушка нагнітанням 12

Сушка просмоктуванням 6

Зона нагріву 27

Зона випалення 24

Зона довипалення 9

Зони охолоджування I і II . 22

Готова продукція поступає через перевантажувальний візок на конвеєр і далі через ваги на склад.

За основу наступного переділу здобуття стали безкоксовим методом прийнятий спосіб прямого відновлення «Мідрекс».

Відновником є газ складу, об. %: СН4 – 0,2…0,4; СО2 – 2…2,5; Н2 – 55…65; СО – 29…35; N2 – 2…3; Н2О – 4…5.

Згідно цьому способу, відновлення окатишів має місце в шахтній печі, в якій гарячий відновний газ реагує в протитечії з оксидами заліза концентрату:

*Fe2 Оз* + *3 Н2* = *2 Fe* + *3 Н2О*

*Fe2 Оз+ 3CO**= 2Fe + 3 CO2.*

Піч металізації складається із завантажувального (проміжного) бункеру, верхнього динамічного затвору із завантажувальним розподільником і завантажувальними труботічками; зони відновлення; проміжної зони; зони охолоджування; живильників; нижнього динамічного затвора і маятникового живильника для вивантаження готового продукту (рис. 9). Зона відновлення розміщується в печі від рівня фурм, через яких вдувається відновний газ, до поверхні рухомого шару шихти під склепінням печі (5—7 м). Гарячий відновний газ вдувається через сопла приблизно на середині печі при температурі 740—800°С і тиску близько 0,2 МПа. Зона відновлення має вогнетривке футерування, її активний робочий об'єм складає 200 м3. Вище за зону відновлення з печі через бічний патрубок виходить колошниковий газ з температурою біля 400°С.

Зони відновлення і охолоджування розділені між собою проміжною зоною. Верхньою межою цієї зони є рівень фурм, а нижня межа визначається рівнем каналів для відсмоктування газу, що охолоджує. Ділянка проміжної зони має приблизно такий же діаметр, як і зона відновлення, а її висота дорівнює половині діаметра шахтної печі. Зона охолоджування не має футерування, її об'єм рівний 120 м3. Гарячий металізований продукт, що опускається із зони відновлення, охолоджується в розташованій нижче зоні газом, що охолоджує, до температури 40—50°С, при якій не відбувається окислення металевого заліза з окатиша.

В принципі охолоджені металізовані окатиші можна транспортувати і на інші підприємства (на тисячі кілометрів) у відкритих вагонах в літні і зимові місяці.. При цьому за рахунок попадання вологи (сніг, дощ) температура шару окатишів збільшується з 55—75 до 100—110°С, унаслідок чого міра металізації знижується, на 2—4%.

Технологічна схема прямого виготовлення сталі, що виключає агломераційний, доменний і конвертерний переділи з одночасною заміною основного палива – вугілля, що коксується, — природним газом, дозволяє у багато разів зменшити викиди пилу, сірчистого ангідриду і оксиду вуглецю (II).

Важливою перевагою нового способу є те, що у складі викидів відсутні такі шкідливі речовини, неминуче супутні традиційній схемі здобуття сталі через чавун і кокс, як феноли, ціаніди, бензпирен і ін. Крім того, заміна залізничного транспорту гідротранспортом залізорудного концентрату виключає його втрати з пилом. Використання пневмотранспорту для сипких матеріалів, повернення в процес відходів виробництва окатишів з їх мокрим подрібненням, безперервне завантаження металізованих окатишів в електропечі, укриття печей в спеціальні камери дозволяють також істотно поліпшити умови праці обслуговуючого персоналу.

У схемі прямого отримання сталі є ще один вагомий плюс – утилізація колошникового газу. Цей газ, після очистки від пилу в скрубері Вентурі, поділяється на два потоки – технологічний і паливний.

Технологічний газ, стискається компресорами, змішується з природним газом (попередньо очищеним від сірки), підігрівається в рекуператорах і конвертується в риформері на нікелевому каталізаторі, перетворюючись у конвертований відновлювальний газ, що прямує до печі металізації.

Риформер – газощільна футерована сталева конструкція довжиною 41 м, шириною 11 м і висотою 9 м, розподілена на 12 секцій. У риформері розташовані 288 реакційних труб, заповнених каталізатором. Риформер гріється за допомогою розташованих у днищі пальників, що працюють на паливному газі. Паливний газ отримують, змішуючи колошниковий газ із природним. На пальники подається повітря, підігріте у рекуператорах до 600°С.

Конвертований газ виходить з риформеру з температурою 900°С, тому перед використанням у печі металізації охолоджується до 740—800°С.



1 — бункер для шихти; 2 — верхній динамічний затвор; 3 – розподільник окислених окатишів; 4 — зона відновлення; 5 — колектор відновного газу; 6 — верхній живильник; 7 — вихід газу, що охолоджує; 8, 9 — середній і нижній живильники; 10 — нижній динамічний затвор; 11 — пристрій для вивантаження окатишів; 12 — розподільник газу, що охолоджує; 13 — вхід газу, що охолоджує; 14 — зона охолоджування; 15 – вхід відновного газу; 16 — вихід колошникового газу

 Рисунок 9 - Шахтна піч металізації