

Розділ 3. ОСНОВИ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Металургія — це галузь науки й техніки та галузь промисловості, що охоплює процеси виробництва металів із руд або інших матеріалів, а також процеси, пов'язані із зміною хімічного складу, структури, а, отже, і зі зміною властивостей металевих сплавів. До металургії відносяться: попередня обробка добутих із надр землі руд; одержання й рафінування металів і сплавів; надання їм визначеної форми й властивостей.

Сучасна металургія має в своєму розпорядженні велику кількість методів добування й рафінування металів.

Основними з цих методів є пірометалургійні та гідрометалургійні.

Гідрометалургійні процеси добування металів із руд або інших матеріалів пов'язані з отриманням водних розчинів відповідних металів із наступним виділенням металів із розчинів.

Пірометалургійні процеси всього циклу виробництва металів або сплавів проходять при високих температурах, їх обов'язковим елементом є отримання рідкого металу.

В сучасній металургії пірометалургія займає провідну роль у виробництві чорних металів, міді, свинцю, нікелю, алюмінію та інших важливих металів як за масштабами виробництва, так і за різноманітністю процесів. Тому в цьому посібнику тільки пірометалургійні процеси і розглядатимуться.

3.1.1 Вихідні матеріали металургійної промисловості

Для здійснення процесів виробництва металів металургійна промисловість використовує такі матеріали:

- **Руда** – це корисна копалина, яка добувається з надр землі. Це гірська порода або мінеральна речовина, з якої при даному рівні розвитку техніки економічно доцільно добувати метали або їх сполуки.

Така економічна доцільність визначається передусім вмістом цінних металів в мінеральній речовині, тобто так званою бракувальною межею металу, що добувається. Бракувальна межа для різних металів різна, наприклад, для заліза вона становить 20...60%, міді 1...3%, нікелю 0,3...1,0%, молібдену 0,005...0,02%.

Величина бракувальної межі визначається не тільки вмістом цінного металу, але й умовами її видобутку з надр землі. Велике значення має і характеристика гірської породи за збагачуваністю. Для гірських порід, що легко збагачуються і, таким чином, легше переводяться в корисну копалину – руду, бракувальна межа знижується.

В гірських породах корисний метал знаходиться, як правило, у вигляді хімічних сполук – оксидів, сульфідів, карбонатів, сульфатів. Речовина, що входить до гірської породи і не містить корисного металу, називається **пустою породою**.

Пуста порода в основному складається з оксидів SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO . Якщо пуста порода складається переважно з оксидів SiO_2 і Al_2O_3 , то вона є **кислою**, а якщо з CaO і MgO – то **основною**.

• **Паливо** є необхідним матеріалом для здійснення пірометалургійних процесів. Воно може бути твердим (кокс), рідким (мазут, нафта), газоподібним (природний газ, доменний газ), пилоподібним (кам'яне вугілля).

• **Вогнетриви** – це матеріали, із яких викладається футерівка металургійних печей, де здійснюються пірометалургійні процеси.

Футерівка – захисне внутрішнє облицювання печей, здатне витримувати високі температури і дію агресивних складових тих матеріалів, що містяться в металургійних печах (металу, шлаку, газового середовища). Матеріали називаються вогнетривкими, якщо їх вогнетривкість не нижче 1580°C . За хімічним складом вогнетриви поділяються на *кислі, основні та нейтральні*. До кислих вогнетривів відноситься **динас**. Він містить 90% SiO_2 , має температуру плавлення 1750°C . До основних вогнетривів належить **магнезит** (75...90% MgO , решта CaO , температура плавлення 2000°C), **доломіт** (40% MgO , 60% CaO , температура плавлення $1800\text{...}1950^{\circ}\text{C}$), **хромомагнезит** (20% Cr_2O_3 , 30...60% MgO , решта CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , температура плавлення 2000°C), **магнезитохроміт** (65...80% MgO , 35...20% Cr_2O_3 , температура плавлення вище 2000°C).

До нейтральних вогнетривів належать **шамот і вуглецеві блоки**. До складу шамоту входять 40...42% Al_2O_3 , 50...60% SiO_2 , решта Fe_2O_3 . Температура плавлення шамоту $1600\text{...}1700^{\circ}\text{C}$. Вуглецеві блоки виготовляють із коксу і випаленого антрациту з додаванням як скріплювача невеликої кількості кам'яновугільної смоли.

• **Флюси**. Флюсами називаються речовини, які додаються до шихти для того, щоб перевести в легкоплавкі шлаки пусту породу руди, золу палива, шкідливі домішки тощо.

При здійсненні пірометалургійних процесів усі складові шихти в металургійних печах повинні бути переведені в рідкий стан для їхнього легкого видалення з печі. Розплавлення пустої породи відбувається легко лише в тому випадку, якщо відношення $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \approx 1$. Таку руду називають *самоплавкою*, однак це буває дуже рідко. В більшості випадків указане відношення значно менше 1, тобто пуста порода є кислою, і тоді до шихти потрібно додавати вапняк (CaCO_3). У випадках же, коли в пустій породі більшість складають основні оксиди, то як флюс застосовується кремнезем (SiO_2).

Шлак у металургійних печах у багатьох випадках слід розглядати не тільки як допоміжний продукт, що утворюється поряд з основним продуктом – металом, але і як важливе технологічне середовище, через яке здійснюється протікання низки фізичних та хімічних процесів, необхідних для отримання металу потрібної якості. Для цього шлак повинен мати певний хімічний склад і в'язкість. Для забезпечення потрібних характеристик шлаку в металургійну піч додають такі речовини як карбід кальцію (CaC_2), плавиковий шпат (CaF_2) та ін.

• **Додаткові матеріали**. В металургійних процесах широко застосовуються такі матеріали як вода, кисень, стиснуте повітря, інертні та малоактивні гази (аргон, азот), феросплави, модифікатори та інші речовини, із допомогою яких доводять метал до потрібної кондиції.

В сучасній техніці історично склався поділ металургії на чорну та кольорову. Чорна металургія охоплює виробництво сплавів на основі заліза: чавуну, сталі, феросплавів. На чорні метали припадає біля 95% всієї металопродукції, що виробляється у світі. Кольорова металургія охоплює виробництво більшості з решти металів періодичної системи. Термін „кольорові метали” не слід сприймати буквально. Фактично існує лише два кольорових метала: рожева мідь і жовте золото. Щодо решти металів можна говорити не про їх колір, а про їх різні відтінки, найчастіше сріблясто-сірого або червонуватого тонів.

В цьому посібнику розглянемо основи виробництва як чорних металів – чавуну та сталі, так і кольорових – міді, алюмінію, магнію, титану.

Основною продукцією чорної металургії як галузі промисловості є сталь різних типів та марок у вигляді різноманітного сортаменту прокатного виробництва (листи, труби, сортовий і спеціальний прокат).

Виробництво сталі в світовій практиці здійснюється в основному двоступінчатим способом, суть якого полягає в тому, що спочатку із залізних руд в доменних печах виплавляють чавун (перший ступінь), а потім цей чавун, який називається **переробним**, переробляють в сталь (другий ступінь).

Виробництво сталі одноступінчатим способом, в якому виключався б доменний процес, поки що не знайшло широкого розповсюдження в чорній металургії, хоча у світі вже розроблено й впроваджено кілька вдалих технологій для здійснення такого процесу.

Контрольні питання

1. Суть металургійного виробництва.
2. Вихідні матеріали металургійного виробництва.
3. Способи добування металів із руд.
4. Продукція металургії.

3.2 ВИРОБНИЦТВО ЧАВУНУ

В цьому розділі йтиметься про чавун первинної плавки. Він виплавляється в доменних печах металургійних заводів із первинної залізорудної сировини, якою є, починаючи з 1975 року, не залізна руда, а виключно продукти її переробки - **агломерат** і **котуни**, застосування яких більш ефективно, ніж залізної руди.

3.2.1 Сирі вихідні матеріали для доменної плавки

До сирих матеріалів металургійного виробництва чавуну відносяться руди, паливо й флюси.

Залізні руди, придатні для виробництва чавуну, поділяються на:

1) **магнітний залізняк**, або **магнетитова руда**, за назвою мінералу **магнетиту**, в якому міститься магнітний оксид заліза Fe_3O_4 . Магнітний залізняк містить 55...60% Fe ; 0,02...0,7% P і кислу пусту породу (SiO_2 , Al_2O_3). Магнетит має високу магнітну сприйнятливість, і тому магнітні залізняка можна збагачувати електромагнітним способом, який є одним із найбільш ефективних і розповсюджених способів збагачення залізних руд;

2) **червоний залізняк**, або **гематитова руда**. Це безводний оксид заліза Fe_2O_3 , який представлений у рудах мінералом **гематитом**. Червоний залізняк містить 55...60% Fe , незначну кількість фосфору і сірки. Пуста порода - кисла (SiO_2 , Al_2O_3);

3) **бурий залізняк**, або водний оксид заліза $2 Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ (мінерал **лимоніт**). В бурих залізнях міститься 37...40% Fe , 0,5...1,5% P . Бурі залізні руди найбільш розповсюджені в земній корі. Але – ця руда бідна, волога, до того ж погано піддається збагаченню, тому її використовують порівняно мало;

4) **шпатовий залізняк**, або карбонат заліза $FeCO_3$ (мінерал **сидерит**). Містить 30...40% Fe , 0,5...0,6% S , близько 0,02% P . Пуста порода – основна з підвищеним вмістом магнезиту $MgCO_3$.

Флюси вводять у доменну піч для переведення пустої породи руди й палива (коксу) у шлак потрібного хімічного складу з певними фізичними властивостями. Температура плавлення оксидів, що входять до складу пустої породи та до золи коксу (SiO_2 - 1728, Al_2O_3 - 2040, CaO - 2570, MgO - 2800 $^{\circ}C$) значно вища температури шлаку в доменній печі (1450...1600 $^{\circ}C$). При певному співвідношенні вказаних оксидів утворюються легкоплавкі сполуки з температурою плавлення нижчою 1300 $^{\circ}C$. Потрібно також, щоб шлаки в доменній печі містили певну кількість основних оксидів CaO і MgO для забезпечення ефективного видалення сірки з металу. Наприклад, рекомендується, щоб у шлаках відношення $(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)$ було близьке до 1,0, а відношення SiO_2/Al_2O_3 було рівним 2,0...4,5.

Таким чином, в залежності від пустої породи руди й типу палива потрібно застосовувати основні, кислі або глиноземні флюси. Оскільки залізні руди містять, як правило, кислотну породу, то застосовують у доменній плавці основний флюс, який складається з вапняку $CaCO_3$, або доломітизованого вапняку, що містить ще і $MgCO_3$.

У сучасній металургії флюс вводиться не як окрема складова шихти, а разом із залізородними концентратами, які виробляють із залізної руди - агломератом або котунами.

В доменній плавці використовують також деякі відходи виробництва, які містять Fe , Mn , CaO і MgO і є заміниками залізних руд і флюсу. Найчастіше застосовують колошниковий пил, який утворюється в доменних печах і містить 40...56% Fe і 3...15% C . З метою утилізації його додають у шихту при виготовленні концентратів.

Паливо для доменної плавки слугує не тільки для нагрівання й розплавлення шихти, але і як основний хімічний реагент для відновлювальних процесів у печі.

Для доменного процесу підходить міцне і таке, що не спікається, тверде паливо. Його більша частина повинна зберігатися твердою, кусковою і міцною до нижньої частини печі. Таке паливо можна тільки частково замінити іншим (рідким, газо- і пилоподібним).

Тверде паливо має задовольняти такі основні вимоги:

- 1) висока теплота згорання;
- 2) достатня міцність і термостійкість, щоб не утворювалось багато дріб'язку при нагріванні палива й проходженні його через піч;

3) протидія спіканню в умовах доменного процесу;

4) достатня чистота за вмістом шкідливих домішок - сірки й фосфору, а також кремнезему (SiO_2) і глинозему (Al_2O_3), які переходять у золу і потребують застосування флюсів.

Палива природних видів не задовольняють ці вимоги, головним чином, внаслідок низької термостійкості й спікливості. Тому для доменної плавки тверде паливо виготовляють спеціально: кокс або деревне вугілля. Останнє втратило своє значення, а у великих доменних печах його взагалі не застосовують внаслідок невеликої міцності. В сучасному доменному виробництві єдиним паливом є кокс.

Кокс отримують сухою перегонкою кам'яного вугілля в коксових печах або камерах коксування. Для виготовлення коксу використовують суміш вугілля різних сортів, основою яких є коксівне вугілля. Вугільну шихту подрібнюють, так щоб у шихті містилось не менше 92...94% фракції розміром до 3 мм, оскільки це сприяє отриманню коксу з меншою кількістю тріщин. Кокс виготовляють у печах, які являють собою камери шириною 0,4...0,6 м, довжиною біля 15 і висотою біля 5 м.

Корисний об'єм такої камери 30 м^3 , а маса шихти, що завантажується в неї, 22 т.

Коксові печі зібрані в коксові батареї, в кожній з яких по 40...70 печей. Продуктивність сучасної батареї досягає 1500 т коксу на добу.

Камери в коксових батареях розташовані на деякій відстані одна від одної, між ними рухаються продукти спалювання газу з температурою $1400 \div 1500 \text{ }^\circ\text{C}$, за рахунок чого шихта в коксових камерах нагрівається до температури приблизно $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Період коксування триває 14,5...16 годин, після чого утворений у камерах коксовий "пиріг" виштовхується з неї і гаситься водою, або, що краще, інертним газом. З 1 т шихти виходить 750...800 кг коксу і 320...330 м^3 коксового газу, який містить 55...85 % H_2 , 20...23 % CH_4 (метан) і $\approx 8\%$ N_2 . Його теплота згорання становить 17,5...18,5 МДж/м^3 . Крім цього при коксуванні утворюються й інші хімічні продукти – бензол, феноли, нафталін, кам'яновугільна смола, сульфат амонію та ін.

В коксі міститься 80...85% С, 8...12% золи, 0,5...1,8% S і 0,02...0,2% P. Для застосування в доменній печі використовують куски коксу 20...60 мм.

В останні роки при доменній плавці частину коксу замінюють природним або коксовим газом, мазутом або пилоподібним паливом. Ці види палива є джерелами відновлювальних газів (CO і H_2) і сприяють покращанню процесу відновлення оксидів заліза, що дає значну економію коксу.

3.2.2 Підготовка залізних руд до доменної плавки

Підготовка залізної руди до плавки має велике значення, оскільки від цього залежить надходження в піч залізнорудної сировини визначеної кусковатості, рівномірного хімічного складу, доброї відновлюваності і, головне, із високим вмістом заліза. Чим ретельніше готують руду до плавки, тим вища продуктивність доменної печі, нижчі витрати палива і якісніший чавун, що виплавляється. Так, підвищення вмісту заліза в залізнорудному концентраті на 1% забезпечує зниження витрат коксу на 2%, або приблизно 10 кг/т чавуну. Крім того, із

підвищенням вмісту заліза в шихті зменшується вихід шлаку при доменній плавці. Для одержання залізорудної сировини з високим вмістом заліза розроблені й впроваджені ефективні способи збагачення залізних руд, які забезпечують вміст заліза в концентратах 63...67%, а в окремих випадках навіть 69...72% Fe.

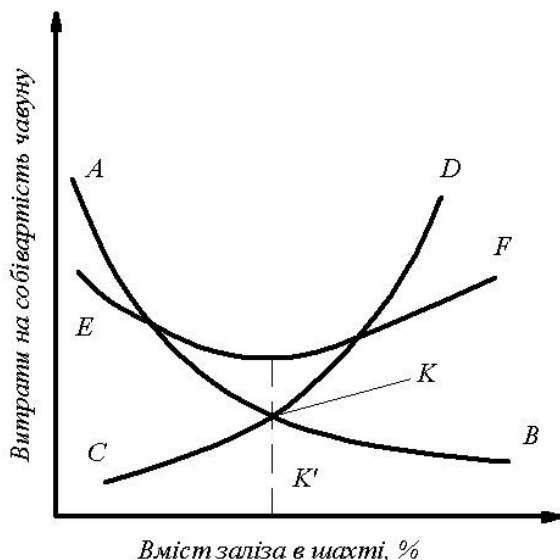


Рисунок 5 –Схема графічного визначення оптимального вмісту заліза в шихті

З підвищенням вмісту заліза в концентратах зростають витрати на збагачення руд, що наведено кривою *CD* на рис. 5, в той час, як витрати в доменному цеху скорочуються (крива *AB*).

Перетин кривих *AB* і *CD* у точці *K* показує на оптимальний ступінь збагачення (точка *K'* на осі абсцис); що відповідає найменшій собівартості чавуну (крива *EF*). Для багатьох руд оптимальний вміст заліза в концентратах знаходиться в межах 64...67%. Для здійснення доменної плавки застосовують підготовку залізних руд в такій послідовності: 1) роздрібнення й сортування за величиною грудок; 2) збагачення; 3) перемішування для досягнення рівномірного хімічного складу; 4) згрудковування збагаченої подрібненої руди для одержання грудок 10...40 мм.

Роздрібнення руди здійснюється в декілька стадій, внаслідок чого грудки руди 600...1000 мм перетворюються в частки розміром $\approx 0,07$ мм.

Первинне роздрібнення руди до розмірів 6...25 мм здійснюється в установках, які називаються дробилками на гірничорудних підприємствах (кар'єрах і рудниках). Для тонкого подрібнення до часток <1 мм застосовуються млини, як правило, обертового типу, в яких подрібнення здійснюється кулями або стержнями.

Роздрібнення руди - енергомісткий і дорогий процес. Його вартість на збагачувальних фабриках складає 35...70% від витрат на весь цикл збагачення, а вартість обладнання для здрібнення досягає 60% від вартості обладнання фабрики.

Поділ роздрібненого матеріалу за розмірами фракцій називається **класифікацією**. Класифікацію матеріалу з частинками більшими за 1 мм виконують на механічних ситах - **грохотах**. Якщо частинки дрібніші за 1 мм, то класифікація проводиться у воді (мокра класифікація) на апаратах, які називаються гідравлічними класифікаторами і працюють за принципом використання різниці швидкостей падіння зерен різної величини.

Збагачення руд – це такий процес обробки корисних копалин, метою якого є підвищення вмісту корисного компонента та зниження шкідливих

домішок шляхом відокремлення рудного мінералу від пустої породи або відокремлення одного цінного мінералу від іншого. Результатом збагачення є готовий продукт – **концентрат**, більш багатий за вмістом певного металу, ніж вихідна руда, і залишковий продукт – **хвости**, бідніші за вихідну руду.

Збагачення залізних руд може здійснюватись такими способами:

- **Промивання.** При цьому способі збагачення потоки води розмивають і виносять частинки глини й піску, а також дрібну руду. Тому промиванню піддають крупнокускові руди, а дрібні класи направляють на подальше збагачення іншими способами.

- **Гравітація.** При гравітаційному збагаченні мінерали розділяються за густиною в рідинному середовищі, де під дією струменя води, який пульсує у вертикальному напрямі, зерна різної густини розшаровуються, більш легкі (пуста порода) витісняються у верхні шари, а більш важкі осідають вниз.

- **Магнітна сепарація.** Найбільш розповсюдженим способом збагачення залізних руд є магнітна сепарація, основана на різниці магнітних властивостей залізорудних мінералів і пустої породи. Магнітна сепарація полягає в тому, що роздрібнену руду вводять у магнітне поле, в якому зерна магнітного мінералу намагнічуються, притягуються до магніту і, долаючи сили, що постійно діють на руду (тяжіння, відцентрові та ін.), рухаються в одному напрямі, а немагнітні частинки під дією цих сил рухаються в іншому напрямі. На рис. 6 наведена схема, за якою реалізується один із способів затримання більш магнітних частинок.

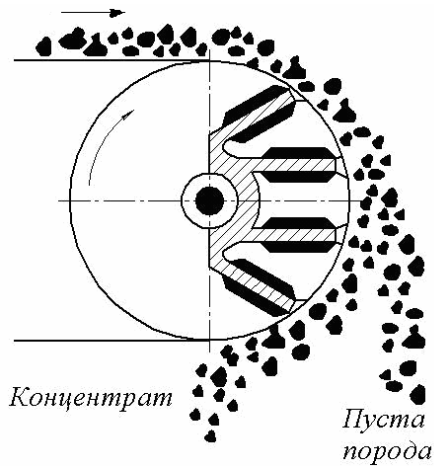
Для слабомагнітних руд застосовується спеціальне випалювання для підвищення їх магнітної сприйнятливості. Цю операцію проводять у відновлювальній атмосфері при спалюванні палива. Відновлювачами є оксид вуглецю й водень. Процес проходить за такими реакціями:



Температура такого випалювання повинна бути 600...800 °C.

- **Флотація.** Цей метод збагачення ґрунтується на різниці фізико-хімічних властивостей поверхонь різних мінералів. Для збагачення руд застосовують тільки пінну флотацію. Вона базується на тому, що одні мінерали (у тонко-розмеленому стані у водному середовищі) не змочуються водою, прилипають до бульбашок повітря, спливають і утворюють на поверхні мінералізовану піну. Це тіла гідрофобні. Інші мінерали змочуються водою, не прилипають до бульбашок повітря і залишаються в середині рідинного середовища (у пульпі). Це гідрофільні тіла. Зазвичай пінний продукт флотації створюється частками корисних мінералів (концентрату), а в пульпі залишається пуста порода (хвости) (пряма флотація). Але, застосовуючи спеціальні флотаційні реагенти, можна вести флотацію і так, щоб спливали мінерали пустої породи (зворотна флотація). Найбільше розповсюдження одержали механічні флотаційні машини, в яких для перемішування пульпи й засмоктування повітря використовуються механічні мішалки.

Рисунок 6 - Схема магнітної сепарації



Згрудковування залізорудної сировини –це процес перетворення дрібних залізорудних матеріалів (руд, концентратів, колошникового пилу) у грудки необхідних розмірів для забезпечення хорошої газопроникності шихти в доменній печі.

В сучасній металургії застосовують два способи згрудковування: *агломерація* й

окочування.

Агломерація. Це процес згрудкування дрібних руд, концентратів і колошникового пилу спіканням при спалюванні палива в шарі матеріалу, що спікається. Агломерацію слід розглядати ширше, ніж згрудкування, оскільки при цьому видаляються деякі шкідливі домішки (сірка, частково миш'як, який є в деяких рудах), розкладаються карбонати й утворюється кусковий пористий, до того ж офлюсований матеріал. По суті – це металургійна підготовка руд до плавки.

Найбільше розповсюдження одержав спосіб спікання агломераційної шихти на колошниковій решітці з просмокуванням повітря через шар шихти.

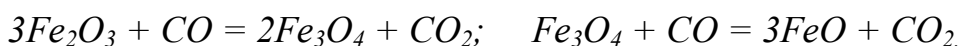
Основні компоненти шихти до спікання %: матеріали, що містять залізо (руда, концентрат, колошниковий пил) із розмірами грудок до 8 мм – 40...50%; вапняк або доломітизований вапняк (флюс) розмірами до 2 мм – 15... 20 %; некондиційний дрібний агломерат розмірами до 10 мм - 20-30%; тверде паливо (кокс) розмірами до 3 мм – 4...6%; волога – 6...9%.

Схема процесу спікання показана на рис. 7. На колошникову решітку 1 чаші або конвеєрної стрічки завантажують так звану “постіль” 2 висотою 30...35 мм, яка складається з некондиційного агломерату крупністю 10...25 мм. Потім завантажують шихту висотою 250...350 мм. Під колошниковою решіткою створюють розрідження (7...10 кПа), що сприяє засмокуванню з поверхні в шар шихти повітря. Щоб процес почався, спеціальним запалювальним пристроєм нагрівають верхній шар шихти до 1200...1300 °С і паливо запалюється.

Горіння підтримується за рахунок засмокування під дією розрідження атмосферного повітря. Зона горіння поступово просувається зверху донизу зі швидкістю 10...40 мм/хв. Після досягнення зоною горіння “постелі” процес спікання закінчується. Зазвичай він продовжується 10 ...20 хв. Паливо згоряє до оксиду вуглецю за реакціями:



В зоні горіння температура досягає 1500 °С. Оксид вуглецю, що утворюється, відновлює оксиди заліза за реакціями:



В зоні високих температур магнітний оксид заліза відновлюється також вуглецем;

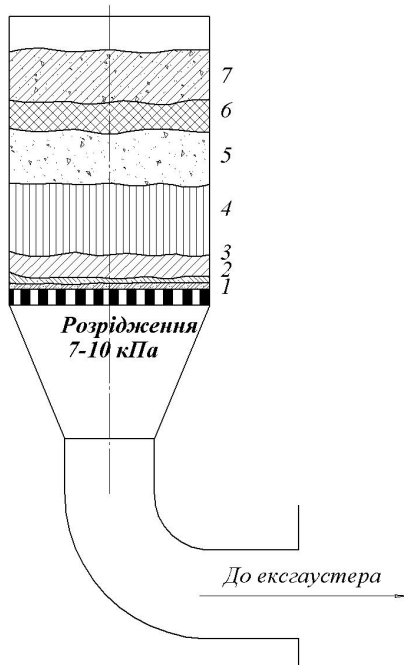
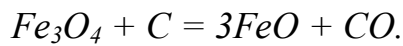


Рисунок 7- Схема агломераційного процесу
1 – колошнікова решітка; 2 – постіль; 3 – 6 – зони відповідно перезволоження, сушки, підігріву, горіння; 7 – готовий агломерат.

В зоні горіння розкладається вапняк ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) і оксиди CaO , FeO , SiO_2 , Fe_2O_3 , взаємодіючи між собою, утворюють легкоплавкі сполуки з температурою плавлення $1130...1250$ °С. В розплавленому стані вони змочують тверді частинки шихти і, затвердіваючи при охолодженні, забезпечують утворення міцних кусків агломерату.

У процесі агломерації вигорає до 90% сірки, яка в шихті знаходиться у вигляді сульфідів заліза FeS_2 (пірит), а інколи у вигляді сульфатів $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (гіпс) і $BaSO_4$ (барит).

Переваги застосування офлюсованого агломерату в доменному процесі:

- Виключаються витрати тепла в доменній печі на розкладання карбонатів $CaCO_3$ і $MgCO_3$. На цей процес витрачається не дорогий кокс, а малоцінне паливо.
- Покращується відновлювальна здатність газів в доменній печі внаслідок зменшення розбавлення їх вуглекислим газом, який утворюється при відновленні рудних матеріалів. До агломераційної шихти вводять ще випалений вапняк (вапно) у невеликій кількості (3...6% від маси шихти) для покращення газопроникності шихти і підвищення міцності агломерату.
- Покращується процес шлакоутворення, оскільки в офлюсованому агломераті оксиди щільно контактують між собою.
- Зменшується число мінералів, що завантажуються в доменну піч.
- Прискорюється процес плавки, підвищується продуктивність доменних печей, скорочуються витрати коксу (на 6...15%).

Процес агломерації, зазвичай, здійснюється на агломераційних машинах продуктивністю $1500...10000$ т агломерату за добу

Окочування (виробництво *котунів*). Розширення застосування бідних руд і особливо прагнення до більш глибокого збагачення їх призвели до одержання тонкорозмелених залізнорудних концентратів ($< 0,07$ мм), для яких знадобились нові способи згрудкування. У зв'язку з цим з 1945...1955 років почав розвиватися так званий процес окочування.

Шихтою для виробництва котунів є концентрат, некондиційні котуни, дрібно змелений вапняк (для виробництва офлюсованих котунів) у кількості

10...12%; для кращого окочування і міцності до шихти додають бентонітову глину (1,0...1,2%); вологість шихти 8...10%. Після ретельного змішування компонентів шихти вона подається на тарільчатий гранулятор-чашу діаметром 5,5...7,0 м, що обертається з частотою 6...9 об/хв навкруги осі, розташованої під кутом 40...60° до горизонту. У грануляторі при коловому його рухові шихта поступово перетворюється в гранули-грудки. З гранулятора вивантажуються тільки грудки, що досягли визначеного розміру (кульки діаметром 10...20 мм – котуни). Після цього котуни сушать при 200...500 °С і випалюють при 1200...1350 °С. Після випалювання котуни зміцнюються так, що вони витримують транспортування, перевантажування без значних руйнувань, чого не можна сказати про агломерат, який є досить гігроскопічним і руйнується при транспортуванні.

3.2.3 Будова доменної печі

Доменна піч – це піч шахтного типу. Зверху в піч завантажують сирі матеріали (агломерат або котуни, кокс), а в нижню частину через фурми подають нагріте повітря і рідке, газоподібне або пилоподібне паливо. Одержані від спалювання палива газу проходять через стовп шихти і віддають їм свою хімічну та теплову енергію. Рудна шихта, опускаючись, нагрівається, відновлюється й плавиться. Частина коксу витрачається в печі на відновлення заліза та інших елементів, на навуглецьовування заліза, але більша його частина досягає фурм, де і згорає. Сучасна найбільша у світі за розмірами доменна піч на Криворізьському металургійному заводі об'ємом 5000 м³ кожної доби споживає до 23000 т шихти, 18000 т дуття (повітря), 1700 т природного газу і видає 12000 т чавуну, 4000 т шлаку, 27000 т колошникового газу.

На рис. 8 показано загальний вигляд доменної печі. Доменна піч зовні має захисний суцільно зварений кожух із листової сталі товщиною до 40 мм.

Внутрішня частина печі футерована вогнетривкими матеріалами. Товщина футерівки до 750 мм. Для підвищення стійкості вогнетривкої кладки в ній встановлюються водяні холодильники (приблизно на 3/4 висоти печі). Засипний апарат печі складається з великого 4 і малого 5 конусів з приймальною воронкою 7. Для забезпечення рівномірного розподілення шихти в міжконусному просторі 10, малий конус 5 і його воронка обертаються навкруги своєї осі за допомогою пристрою 6.

Скіп перевертається на колошнику й шихта спочатку вивантажується в приймальну воронку, потім при опусканні малого конуса – в міжконусний простір і при опусканні великого конуса – в доменну піч. Наявність двох конусів, що опускаються по черзі, забезпечує герметизацію колошника при завантаженні шихти. Є й інші типи засипних апаратів.

В нижній частині печі знаходиться фурмений пристрій 2, через який подається нагріте до 1100...1300 °С повітря і добавки газоподібного, рідкого або пилоподібного палива. Рідкі продукти плавки безперервно стікають донизу в горн печі, де розташовані льотки 1 для випуску чавуну і 11 для випуску шлаку. Через ці льотки періодично випускають продукти плавки – чавун і шлак.

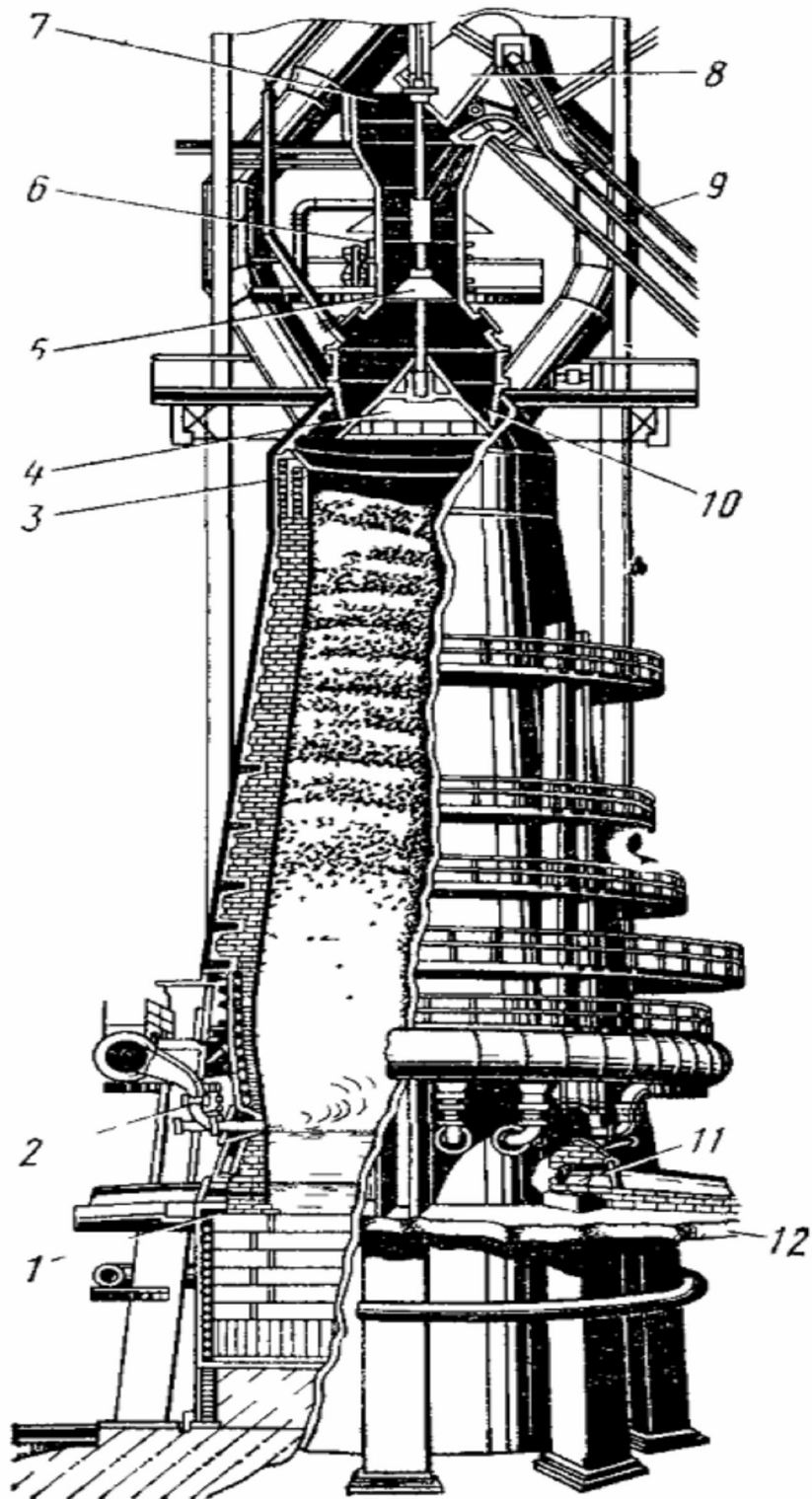


Рисунок 8 – Розріз доменної печі

1 - лютка для випуску чавуну; 2 - фурми для подачі дуття; 3 - колошник;
 4, 5, 6, 7, 10 - засипний апарат; 8 - вагонетка (скіп) для шихти; 9 - похилий міст для підйому вагонеток із шихтою; 11 - лютка для випуску шлаку;
 12 - площадка навкруги печі

3.2.4 Доменний процес

В сучасній доменній печі тривалість перебування матеріалів складає 4...6 год, а газів – біля 1...3 с.

Шихту завантажують у піч окремими порціями – **колошами**. Рудну частину колоші можна завантажувати окремо або одночасно з коксом.

Доменна піч працює за принципом протитечії: шихтові матеріали поступово опускаються наниз, а назустріч їм рухається потік гарячих газів, що утворюються при згоранні палива в горні печі.

Горіння палива. Найважливішим процесом у горні печі є спалювання вуглецю коксу, що забезпечує виділення необхідного тепла, утворення відновлювальних газів і звільнення об'єму, який заповнюється матеріалами, що знаходяться вище, сприяючи цим рухові шихти в печі зверху вниз.

Нагріте до 1100...1300⁰C повітря (дуття) подається через рівномірно розташовані по колу горна фурми з вихідними отворами діаметром 180...250 мм. Тиск дуття на сучасних доменних печах складає 150...300 кПа, кількість дуття на одну фурму 170...230 м³/хв, швидкість повітря на виході з фурми 100...150 м/с. При таких параметрах струмінь дуття має значну кінетичну енергію, викликає циркуляцію грудок коксу перед фурмами і створює окислювальну зону на відстані до 1500 мм від фурми.

В цій атмосфері куски коксу згорають, температура розвивається до 1900...2000⁰C. При таких температурах і в умовах надлишку вуглецю горіння коксу протікає за реакціями:



тобто кінцева стадія горіння вуглецю коксу $2C + O_2 = 2CO + Q$,

де Q - тепловий ефект реакції.

Останнім часом широко практикується вдування в горні печі природного газу і в деяких випадках мазуту і пилоподібного палива. Кінцева стадія горіння природного газу протікає за реакцією:

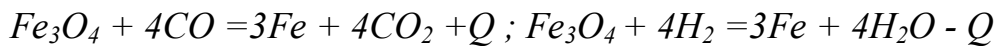
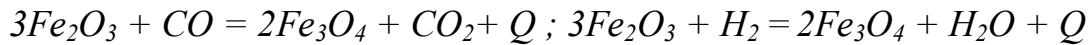


Ефект від вдування газоподібного й твердого палива визначається підвищенням концентрації водню в горновому газі, що приводить, в кінцевому підсумку, до зниження витрат коксу. Разом із тим, при спалюванні цих добавок збільшується кількість продуктів згорання. Так, наприклад, при спалюванні метану кількість горнового газу, який утворюється на 1 кг вуглецю, в 1,7 рази більша, ніж при спалюванні вуглецю коксу. Збільшення кількості газу утрудняє опускання шихтових матеріалів і приводить до зниження інтенсивності доменної плавки. Для підвищення продуктивності печі й зменшення витрат коксу необхідно одночасно з подачею газу або мазуту збагачувати дуття киснем. У вітчизняній практиці доменного виробництва найбільше розповсюдження отримало поєднання збагаченого дуття киснем із вдуванням природного газу.

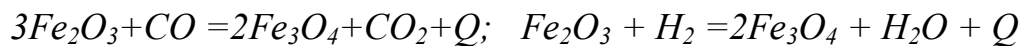
Досвід показує, що на кожний 1 м³ природного газу потрібно вдувати додатково 1,5 м³ кисню. При цьому економиться 0,8 кг коксу, а виробництво чавуну збільшується на 1,2...1,5 кг

Відновлення оксидів заліза відбувається послідовно – від вищих оксидів до нижчих (принцип акад. А.А. Байкова): $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$. Відновлювачами оксидів заліза в доменній печі є вуглець, оксид вуглецю й водень. Відновлення вуглецем прийнято називати *прямим*, а газами – *непрямим*.

Непряме відновлення оксидів заліза відбувається за реакціями:
при температурі $< 570^\circ C$ (верхня частина шахти)



при температурі $> 570^\circ C$



Можна вважати, що вищі оксиди заліза відновлюються до оксиду FeO непрямым шляхом, а FeO може відновлюватись як непрямим, так і прямим шляхом ($FeO + C = Fe + CO - Q$). Пряме відновлення заліза відбувається з поглинанням тепла і протікає при температурах вище $950...1000^\circ C$.

При сучасних технологіях ведення доменної плавки ступінь прямого відновлення заліза складає $40...60\%$ на печах без застосування природного газу або мазуту і $20...40\%$ на печах, де застосовувались вуглеводні домішки.

В доменній печі залізо відновлюється майже повністю. Втрати зі шлаком складають $0,2...1,0\%$.

Відновлення кремнію. Кремній присутній в рудах, головним чином, у вигляді кремнезему, а в агломераті – у вигляді силікатів. Спорідненість кремнію з киснем дуже велика, тому він може відновлюватись в печі тільки прямим шляхом за реакцією: $SiO_2 + 2C = Si + 2CO - Q$, яка може протікати тільки при високій температурі - не нижчій $1450^\circ C$. Ступінь відновлюваності кремнію складає $2...25\%$. Для виплавки чавунів з високим вмістом кремнію (ливарних чавунів) потрібно значно підвищувати витрати коксу й застосовувати високотемпературне дуття. Прагнення до економії коксу привели до значного скорочення виплавки ливарних чавунів і припинення виплавки феросиліцію в доменних печах. При виплавці в доменних печах переробних чавунів кремній відновлюється лише на $2...8\%$, решта у вигляді SiO_2 залишається в шлаку.

Відновлення марганцю. Марганець надходить у доменну піч як постійна домішка в залізній руді у вигляді оксидів MnO_2 , Mn_2O_3 і Mn_3O_4 або агломераті у вигляді силікатів марганцю $MnO \cdot SiO_2$ і $(MnO)_2 \cdot SiO_2$.

Вищі оксиди марганцю відновлюються в шахті печі до оксиду MnO при помірних температурах ($200...500^\circ C$) оксидом вуглецю CO : $MnO_2 \rightarrow Mn_2O_3 \rightarrow Mn_3O_4 \rightarrow MnO$ з виділенням значної кількості тепла (біля 2870 кДж на 1кг марганцю). Відновлення ж марганцю з оксиду MnO потребує, навпаки, великих затрат тепла і можливе при температурах вище $1100^\circ C$ і тільки вуглецем: $MnO + C = Mn + CO - Q$. За цією реакцією на 1 кг марганцю витрачається 5225

кДж. Відновлення марганцю з силікатів також пов'язане зі значними тепловими витратами і полегшується при наявності вапна: $MnSiO_3 + CaO + C = Mn + CaSiO_3 + CO - Q$. При виплавці чавунів марганець у доменній і печі відновлюється на 55...65%. Решта залишається у вигляді оксидів у шлаку.

В доменних печах виплавляють також спеціальні марганцеві сплави – **феромарганець** (75% *Mn*) і **дзеркальний чавун** (15...25% *Mn*). Для цього застосовують спеціальну шихту, що складається з марганцевих руд або марганцевого агломерату й дуття, збагачене киснем до 30...35%.

Відновлення інших елементів. До складу доменної шихти входять і такі елементи як титан, нікель, ванадій, миш'як, фосфор, сірка та інші. За зростанням спорідненості до кисню ці елементи розташовуються в такій послідовності: *Cu, As, Ni, Fe, P, Zn, Mn, V, Cr, Si, Ti, Al, Mg, Ca*. Ступінь відновлення цих елементів у доменній печі відповідає їх розташуванню в наведеному ряду.

Такі елементи як мідь, миш'як, фосфор, як і залізо, майже повністю відновлюються і переходять у чавун. Повністю відновлюється і цинк, але він сублімується, переходить у газу і відкладається в порах і швах кладки шахти, викликаючи її ріст і розриви кожуха печі. Ванадій і хром відновлюються відповідно на 70...80 і 80...90%, а титан - аналогічно кремнію.

Алюміній, магній і кальцій у доменній печі не відновлюються.

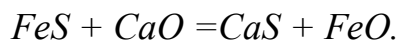
Окремо потрібно зупинитися на таких елементах як сірка й фосфор. Вони є, безумовно, шкідливими елементами і на всіх етапах виробництва кінцевого продукту – сталі, технологічні процеси розробляють так, щоб цих елементів було в металі щонайменше. Це відноситься і до доменного процесу.

Фосфор у залізних рудах знаходиться, головним чином, у вигляді $P_2O_5 \cdot 3CaO$. В доменній печі фосфор відновлюється оксидом вуглецю, воднем, твердим вуглецем. Весь фосфор, що вноситься із шихтою, відновлюється, і практично повністю переходить у чавун.

Слід відмітити, що в деяких випадках фосфор є корисною домішкою. Так, він значно підвищує рідкотекучість чавуну і для тонкостінного, ажурного художнього литва фосфор додається в чавун спеціально. Так звані **автоматні сталі**, тобто сталі, призначені для обробки на верстатах-автоматах при виготовленні гайок, болтів, гвинтів тощо, з метою утворення ламкої стружки, повинні також мати підвищений вміст фосфору. Але у всіх цих випадках збільшення вмісту фосфору забезпечується додаванням до рідкого металу **ферофосфору**.

Сірка – особливо шкідлива домішка в чавуні і сталі. В чавуні може розчинятись до 0,9% *S*, тоді як у конструкційних сталях та чавунах її не повинно бути більше сотих часток відсотка. Сірку легше видалити з руди й чавуну, ніж із сталі, тому особливу увагу приділяють видаленню сірки при підготовці руд і в доменному процесі.

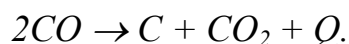
Основна кількість сірки вноситься в доменний чавун із коксом, який містить від 0,5...0,7 до 1,3...2% *S*. При доменній плавці 10...20% *S* виноситься з газами SO_2 , H_2S та ін. Решта сірки у вигляді FeS переходить у чавун і у вигляді CaS - у шлак. Для видалення сірки з чавуну потрібно перевести її у сполуки, нерозчинні в чавуні, наприклад, в CaS . Тому в печі потрібен рідкий і добре нагрітий шлак підвищеної основності як умова протікання реакції:



Найбільш інтенсивно сірка видаляється при проходженні крапель чавуну через шар шлаку; коефіцієнт переходу сірки в шлак становить 0,9...0,99.

В деяких випадках застосовують позадоменне видалення сірки, оброблюючи чавун різними реагентами, такими як кальцинована сода (Na_2CO_3), магній, карбід кальцію (CaC_2), порошкоподібним вапном та ін. Цим методом можна видалити 50...95% сірки, що знаходиться в чавуні, але він потребує значних додаткових витрат і не знайшов широкого практичного застосування.

Навуглецьовування заліза й утворення чавуну. Залізо, відновлене з оксидів у доменній печі, поглинає вуглець та інші елементи, утворюючи чавун. Процес навуглецьовування починається ще у твердому стані в середній та верхній частинах шахти. В цьому процесі значну роль відіграє свіжовідновлене залізо, яке є каталізатором для розкладання оксиду вуглецю на сажистий вуглець і вуглекислий газ за реакцією:



Маючи підвищену хімічну активність, сажистий вуглець взаємодіє з атомами заліза й утворює карбід заліза: $3Fe + C = Fe_3C - Q$. Цей процес навуглецьовування помітно розвивається при 450...600 °C. З підвищенням вмісту вуглецю в залізі температура плавлення його значно знижується і приблизно при температурі 1250 °C відбувається оплавлення заліза і утворення крапель чавуну, які, контактуючи з розжареним коксом, ще інтенсивніше поглинають вуглець, насичуючись ним до вмісту 4,0...4,5% C. На різних горизонтах печі в чавун переходять і інші елементи, що відновились (кремній, марганець, фосфор, а в деяких випадках і ванадій, хром, нікель, мідь, миш'як), а також сірка.

З накопиченням в горні рідкого чавуну, він випускається з доменної печі (10...18 раз на добу, в залежності від розмірів печі) в чавуновозні ковші місткістю 80...100 т. Переробний чавун із цих ковшів зливають у міксери (накопичувачі) місткістю до 2000 т, де він витримується для вирівнювання хімічного складу, температури, для додаткового видалення сірки. Ливарний чавун подається на розливну машину – конвеєр із металевими формами (мульдами); в них одержують невеликі виливки – **чушки** масою до 55 кг, які направляють на машинобудівні заводи.

Шлакоутворення. Крім чавуну в доменній печі утворюється шлак, до якого переходять оксиди елементів, що не відновились (CaO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 і в невеликій кількості MnO і FeO). Первинний шлак із підвищеним вмістом MnO і FeO утворюється при температурі ~ 1000°C. Під час опускання первинного шлаку змінюється його склад і кількість, і, коли шлак наближається до горну, майже все залізо і значна кількість марганцю встигають відновитися, а вміст у ньому CaO , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 все більше збільшується. На горизонті фурм до шлаку приєднується зола коксу. Остаточний шлак на 85...95% складається з SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , крім того, містить 2...10 % MgO ; 0,2...0,6% FeO ; 0,3...2% MnO ; 1,5...2,5% S у вигляді CaS .

Для оцінки властивостей шлаку користуються коефіцієнтами, що показують співвідношення між його головними компонентами. Наприклад, кори-

стуються показником основності CaO/SiO_2 або $(CaO + MgO)/SiO_2$. Останнє співвідношення для різних умов плавки коливається в межах 1,05...1,45.

Оцінку властивостей шлаку здійснюють також і за його фізичними характеристиками, такими як в'язкість, температура плавлення та ін.

Шлак, по мірі його накопичення в горні випускається через шлакові льотки в ковші – шлаковози місткістю біля 30 т і направляється на переробку.

3.2.5 Продукти доменної плавки

Кінцевим продуктом доменної плавки є чавун, шлак і доменний газ.

Доменні чавуни за своїм призначенням поділяється на три основні види: переробні, ливарні, доменні феросплави.

- **Переробний чавун** призначений для подальшої переробки в сталь. На його долю припадає біля 90% загального виробництва чавуну. Його хімічний склад: 3,8...4,4% C; 0,3...1,2% Si; 0,2...1,0% Mn; 0,15...0,2% P і 0,02...0,07% S.

- **Ливарний чавун** застосовується як складова шихти при виплавці конструкційних чавунів. Ливарний чавун випускається шести марок від ЛК0 до ЛК5 (Л – ливарний; К – коксовий) з вмістом вуглецю 3,5...4,5% , кремнію 0,75...3,75%, які за вмістом марганцю поділяються кожна на три групи ($< 0,5$; 0,51...0,90 і 0,91...1,3%); за вмістом сірки – на три категорії (0,02...0,05; 0,03...0,06 і 0,04...0,07%); за вмістом фосфору – на чотири класи (А – до 0,1% P; Б – 0,1...0,03% P; В – 0,31...0,70% P; Г – 0,71...1,20% P).

- **Доменні феросплави** використовуються при виплавці сталей для розкислення й легування. До них відносяться феромарганець (70...75% Mn; до 2% Si; 0,33...0,45% P; до 0,03% S), дзеркальний чавун (15...25% Mn; $\leq 2\%$ Si; $\leq 0,18\%$ P і до 0,03% S); доменний феросиліцій (9...13% Si, інколи до 18% Si; до 3% Mn; $\leq 0,2\%$ P і до 0,04% S). Останнім часом у доменних печах виплавка феросплавів скоротилась, а феросиліцію припинилась зовсім через неекономічність процесу. Більш доцільно виплавляти феросплави в електричних печах, де одночасно забезпечується їх більш висока якість.

Доменний шлак утворюється в кількості 0,3...0,6 т на 1 т чавуну. У шлаках зазвичай міститься 6...22% глинозему (Al_2O_3), 38...42% кремнезему (SiO_2), 38...42% вапна (CaO), 2...12% магнезиту (MgO). При цьому вони характеризуються такими значеннями основності $CaO/SiO_2 = 0,9...1,3$; $(CaO + MgO)/SiO_2 = 1,05...1,45$ і $(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3) = 0,7...1,2$.

Доменні шлаки широко застосовуються для виробництва різних будівельних матеріалів: цементу, вапняно-в'язучих речовин, розчинів і бетонів, шлакової пемзи й вати, стінових матеріалів, шлакової брусчатки тощо.

Доменний (колошниковий) газ виділяється у великих об'ємах (біля 1400 м³ на 1 т чавуну) і безперервно видаляється з доменної печі через газовідводи в колошнику. Після очистки від пилу доменний газ використовується як паливо для опалення повітрянагрівачів доменного цеху, коксових печей, нагрівальних печей, водяних і парових котлів та на інші потреби заводу.

3.2.6 Техніко-економічні показники доменної плавки

Основними показниками, що характеризують роботу доменної печі є: продуктивність за одиницю часу і витрати коксу на тону чавуну.

Для оцінки продуктивності доменних печей застосовують відносний показник: **коефіцієнт використання корисного об'єму доменної печі (КВКО)**, що є відношенням корисного об'єму доменної печі V , m^3 до її середньодобової продуктивності P :

$$КВКО = V/P, \quad m^3 \cdot \text{доб}/m.$$

Чим нижчий КВКО, тим більш продуктивно працює доменна піч. За останні 50 років КВКО покращився майже вдвічі, з 1,15 до 0,55, а на провідних заводах він досягає 0,45 і нижче.

Важливим показником доменної плавки є витрати коксу на 1 т чавуну, що виплавляється. На кращих вітчизняних доменних печах вони складають 300...400 кг/т.

Контрольні питання

Що відноситься до сирих матеріалів металургійного виробництва чавуну?

Залізні руди, їх назва, склад, характеристика.

Яке паливо використовується в доменній плавці?

Як готують залізну руду до доменної плавки?

Що є залізородною сировиною в сучасному доменному процесі?

Що входить до складу шихти в доменній плавці?

В чому полягає суть доменної плавки?

Які основні процеси відбуваються в доменній печі?

Продукти доменної плавки, їх характеристика і використання.

Показники роботи доменних печей.

3.3 ВИРОБНИЦТВО СТАЛІ

Як уже зазначалось, традиційно у світовій практиці металургійного виробництва сталі є технологія, основана на використанні двоступінчатого процесу: 1) виплавка чавуну в доменних печах; 2) переробка доменного чавуну в сталь. Переважна більшість світового виробництва сталі здійснюється саме за цією технологією. Вона передбачає наявність на металургійних заводах доменних цехів і використання як шихтового матеріалу рідкого переробного чавуну. У випадках же, коли на металургійних заводах доменних цехів немає, то сталеплавильне виробництво переробний чавун використовує у вигляді чавунних виливків – чушок (виліванців).

В чавуні значно більше вуглецю (біля 4%), а також марганцю, кремнію та інших домішок, ніж повинно бути в сталі. Тому виплавка сталі – переробка чавуну в сталь – полягає в проведенні окислювальних процесів для видалення надлишку вуглецю та інших елементів. Для забезпечення якості сталі при плавці необхідно по можливості повніше видаляти з металу шкідливі домішки – сірку, фосфор, кисень, азот, неметалеві включення.

Другою головною складовою металошихти при виробництві сталі є металевий брухт (стальний, а в деяких випадках і чавунний). Із загальної кількості брухту біля 45% утворюється безпосередньо на металургійних заводах (відходи при прокатці, браковані виливки тощо). Зазвичай цей брухт використовується на тих же заводах, де він утворюється.