**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**РОБОЧА ПРОГРАМА,**

методичні вказівки та індивідуальні завдання

до вивчення дисципліни «Новітні технології електросталеплавильного виробництва» для студентів спеціальності 7.05040101 та 8.05040101 – металургія чорних металів

Затверджено

на засіданні Вченої ради

академії

Протокол № \_\_\_ від \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**Дніпропетровськ НМетАУ 2013**

УДК

Робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Новітні технології електросталеплавильного виробництва» для студентів спеціальності 7.05040101 та 8.05040101 – металургія чорних металів / Укл. Ю.С.Пройдак, А.П.Горобець. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. – 35 с.

Викладені робоча програма, методичні вказівки та індивідуальні завдання з дисципліни «Новітні технології електросталеплавильного виробництва», наведені перелік тем, зміст дисципліни, її основні поняття, опис процедури самостійної роботи студентів, варіанти індивідуальних завдань, перелік літератури.

Призначена для студентів спеціальності 7.05040101 та 8.05040101 металургія чорних металів, спеціалізації електрометалургія сталі та феросплавів (МЕ904), заочної форми навчання.

Укладачі Ю.С.Пройдак, доктор техн. наук, проф.

А.П. Горобець, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний за випуск В.А.Гладких, д-р техн. наук, проф.

Рецензент

Підписано до друку. Формат 60х84 1/16. Папір друк. Друк плоский.

Облік.-вид. арк. Умов. друк. арк.. Тираж пр. Замовлення № .

Національна металургійна академія України

49600, м. Дніпропетровськ-5, пр. Гагаріна, 4

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Редакційно-видавничий відділ НМетАУ

ЗМІСТ

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛІНИ…………………………….………….... | | 4 |
| 1 РОЗПОДІЛ НАВЧАЛЬНИХ ГОДИН ДИСЦИПЛІНИ .………....………….. | | 5 |
| 2 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ…………………………………………...……………. | | 6 |
| 2.1 Лекційний курс…………………………………………..…………….. | | 6 |
| 2.2 Практичні роботи……………………………………………...……….. | | 6 |
| 3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЙ РОБОТИ….. | | 7 |
| 4 САМОСТІЙНА РОБОТА………………………………….…………..……….. | | 15 |
| 5 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ТА ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ  ЗНАНЬ………………………………………………… ……………..………… | | 15 |
| РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .…..……………………………………..... | | 20 |

**ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛІНИ**

Навчальна дисципліна "Новітні технології електросталеплавильного виробництва" входить до циклу дисциплін за вибором навчального закладу.

**Мета вивчення дисципліни** - поглиблення теоретичних знань з процесів електрометалургійного виробництва сталей і феросплавів, придбання навичок практичної діяльності необхідних для ведення технологічних режимів виробництва спеціальних сталей.

У результаті вивчення дисципліни  студент повинен

**знати** :

- сучасні вимоги до основного і допоміжного обладнання електрометалургійного виробництва;

- теоретичні основи виробництва спеціальних сплавів;

- технологію позапічної обробки електросталі у контрольованих середовищах;

- перспективні напрями покращення якості сталі.

**вміти :**

- керувати електрометалургійним виробництвом сталей;

- виконувати розрахунки технологічних параметрів устаткування для виробництва спеціальних сталей

- проводити аналіз технічних показників процесів електрометалургійного виробництва спеціальних сталей.

**Критерії успішності**: - отримання позитивних оцінок при складанні однієї контрольної роботи у тестовій формі та екзамену.

**Засоби діагностики успішності навчання** - комплект тестових завдань сформованих по темам дисципліни та комплект екзаменаційних білетів.

**Зв'язок з іншими дисциплінами** - дисципліна є однією з завершальних при підготовці спеціалістів та магістрів напряму "Металургія", спеціальності "Металургія чорних металів". Їй передує вивчення нормативних дисциплін (фізика, хімія, математика, фізична хімія); дисциплін професійної і практичної підготовки (Загальна металургія", "Металознавство", "Теоретичні основи електросталеплавильних процесів", "Теоретичні основи електроферосплавних процесів", "Технологічні особливості виробництва електросталі", "Технологічні особливості виробництва феросплавів")

Набуті знання і вміння з дисципліни використовуються в професійній діяльності

1. РОЗПОДІЛ НАВЧАЛЬНИХ ГОДИН ДИСЦИПЛІНИ

Таблиця 1.1 – Розподіл годин за видами занять

|  |  |
| --- | --- |
| Розподіл навчальних годин | КУРС  (СЕМЕСТР) |
| VІ (1) |
| Всього годин за навчальним планом | 144 |
| Аудиторні заняття | 16 |
| з них: |  |
| * лекції | 12 |
| * практичні заняття | 4 |
| Самостійна робота | 128 |
| Кількість контрольних робіт | 1 |
| Підсумковий контроль (екзамен) | Екз. |

2 ЗМІСТ ДИСЦИПЛІНИ

2.1 Лекційний курс

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| №№  з/п | Назва розділу/теми та її зміст | Тривалість (годин) |
| 1 | **Інтенсифікація електроплавки сталі**  Аналітичні дослідження наскрізного використання енергетичних і матеріальних ресурсів в електрометалургійному виробництві. Технології високого рівня. Структура і енергоємність електрометалургійних процесів. Основні напрямки зниження енергоємності. Високі електросталеплавильні технології інтенсифікації електроплавки і тенденції розвитку дугових печей , автоматизація і керування електроплавкою. | 4 |
| 2 | **Виплавка сталі в сучасних понадпотужних печах**  Загальна характеристика технологій плавки в печах. Шихтові матеріали. Склад, хімічні та фізичні властивості шлаків. Температурний режим. Масообміні процеси в дуговій печі. Схеми живлення ванни киснем. Селективне окислювання складових розплаву. Термодинаміка, механізм та кінетика реакції окислення вуглецю, фосфору. Відновлювальні процеси в дугові печі. Відновлення елементів з шлакового розплаву. | 4 |
| 3 | **Позапічна обробка металу**  Позапічна обробка металу в комплексах "електропіч-ковш". Одношлаковий процес. Технології плавки електросталі з пінявими шлаками. Вимоги до показників якості металу. Технологія плавки корозійно стійкої та підшипникової сталі мета технології. Селективне окислення хрому під час продувки. Склад шлаку. Температурний режим плавки. Технологія вакуумно-кисневого зневуглецювання. Позапічна обробка металу в вакуумі. | 4 |

2.2 Практичні роботи

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| №№  з/п | Тема заняття та його зміст | Тривалість (годин) |
| 1 | **Розрахунок шихти для отримання електросталі** | 4 |

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОЇ РОБОТИ

Студенти, які навчаються за напрямом 7.05040101 (8.05040101) – металургія чорних металів, виконують практичну роботу, мета якої – закріпити знання, отримані при вивченні дисципліни «Новітні технології електросталеплавильного виробництва» та ряду загальнотехнічних й спеціальних дисциплін, та навчитися застосовувати їх при розрахунках металургійних процесів, які забезпечують високий технічний рівень та ефективність виробництва електросталеплавильної продукції; отримати та розвивати досвід самостійної роботи зі спеціальною та довідковою літературою, складання розрахунково-пояснювальної записки, а також вміння захищати прийняті в роботі конструктивні та технічні рішення.

Рішення, які приймаються в практичних роботах, повинні бути обґрунтовані необхідними розрахунками та довідковими матеріалами.

Студент виконує практичну роботу відповідно варіанту індивідуальних завдань, який визначає викладач.

*Розрахунок шихти для отримання електросталі (4 години)*

**Расчет шихты для выплавки электростали с использованием металлизированных окатышей.**

Исходные данные для расчета:

Состав металлозавалки: 35% отходов собственного производства, 65% металлических окатышей.

Состав шлака: 48% СаО, 24% SiO2, 3% Fe2O3, 11% FeO (B ≈ 2). Процесс одношлаковый.

Расход электродов 5 кг/т, кокса 4 кг/т.

Загрузка печи окатышами через свод при температуре металла 1560‑1580°С.

Выпуск металла при температуре 1650°С.

Состав металлозавалки и конечного металла, % (табл.3.1).

Таблица 3.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Химический состав, % масс. | | | | | | | | |
| Fe | Fe2+ | Fe3+ | C | Mn | Si | S | P | SiO2 |
| Отходы | 96,5 | − | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0,3 | 0,05 | 0,05 | 0,75 |
| Окатыши | 83,2 | 6,9 | 0,3 | 1,7 | − | − | 0,01 | 0,01 | 4,3 |
| Готовый металл | 99,7 | − | − | 0,2 | 0,1 | − | 0,01 | 0,01 | − |

Исходные данные для баланса приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №№  п/п | Шихта | Всего,  кг | В том числе, кг | | | | | | | | |
| Fe | Fe2+ | Fe3+ | C | Mn | Si | S | P | SiO2 |
| 1 | Отходы | 350 | 338 | − | 2,1 | 0,7 | 1,8 | 0,7 | 0,18 | 0,18 | 2,6 |
| 2 | Окатыши | 650 | 541 | 44,9 | 2,0 | 11,1 | − | − | 0,07 | 0,07 | 28,0 |
| 3 | Кокс | 4,0 | − | − | − | 3,4 | − | − | 0,04 | − | 0,3 |
| 4 | Электроды | 5,0 | − | − | − | 5,0 | − | − | − | − | − |
|  | Итого |  | 879 | 44,9 | 4,1 | 20,2 | 1,8 | 0,7 | 0,29 | 0,25 | 30,9 |

А. Определение количества шлака и расхода извести.

Количество SiO2, переходящее в шлак из шихты:

 кг

При основности шлака 2,0 содержание СаО в извести (не связанное с кремнеземом):

88 − 2 \* 2,5 = 83%

Потребуется извести:

 кг

При этом известь вносит SiO2:

78 \* 0,025 = 2 кг

Образуется шлака:

 кг

Б. Баланс железа.

Количество Fe2+ в шлаке 143 \* 0,11 = 15,7 кг.

Количество Fe3+ в шлаке 143 \* 0,03 = 4,3 кг.

Всего 20,0 кг.

Из окатышей восстанавливается Fe2+:

44,9 − 15,7 = 29,2 кг

Получено жидкой стали из 1000 кг металлошихты:

(879 + 29,2 − 2,0)Fe + 1,8С + 0,8Mn + 0,1P + 0,14S = 911 кг

Теряется со шлаком при выпуске плавки 10 кг.

В. Расчет расхода раскислителей.

Раскисление производится в ковше из расчета получения в готовой стали 0,65% Mn и 0,25% Si.

Угар марганца (ФМн 78) принимаем 10%.

Угар кремния (ФС 45) принимаем 15%.

На 1 т жидкой стали расходуется:

ферромарганца  кг

ферросилиция  кг

Итого: 13,27 кг

Окисляется Mn и Si:

(6,5 − 1,5) \* 0,10 + 2,5 \* 0,15 = 0,87 кг

Масса металла в ковше увеличивается на 13,27 − 0,87 = 12,4 кг/т жидкой стали.

Принимая, что при разливке теряется 35 кг металла, выход годного из 1000 кг металлической шихты составляет:

911 − 10 + 12,4 − 35 = 878 кг или 87,8%.

Г. Баланс газов.

Принимаем, что половина углерода окисляется до СО, а половина углерода до СО2, тогда отношение СО/СО2 составит 1,0.

На окисление компонентов металлошихты требуется кислорода:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| С | до | СО | : | 0,5 \* | 18,4 \* | 16/12 | = | 12,26 |
| С | до | СО2 | : | 0,5 \* | 18,4 \* | 32/12 | = | 24,53 |
| Mn | до | MnO | : | 1,0 \* | 16/54 | \* 9 | = | 0,29 |
| Si | до | SiO2 | : | 0,7 \* | 32/28 |  | = | 0,80 |
| P | до | P2O5 | : | 0,15 \* | 80/62 |  | = | 0,19 |
| Fe | до | Fe3O4 | : | 2,0 \* | 64/3 | \* 56 | = | 0,76 |

Итого: 38,8 кг.

При восстановлении Fe2+ выделится кислорода:

29,2 \* 16/56 = 8,4 кг

Итого потребуется кислорода: 38,8 − 8,4 = 30,4 кг.

Образуется СО:

0.5 \* 18,4 + 12,26 = 21,5 кг СО или

21,5 \* 22,4/28 = 17,2 м3

Образуется СО2:

0.5 \* 18,4 + 24,53 = 33,7 кг СО2 или

33,7 \* 22,4/44 = 17,2 м3

Образуется пылевидный Fe3O4:

2,0 + 0,76 = 2,76 кг.

Материальный баланс на 1000 кг металлошихты.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Поступило | | | Получено | | |
|  | кг | % |  | кг | % |
| Отходы | 350 | 31,6 | Сталь | 901,0 | 81,4 |
| Окатыши | 650 | 58,7 | Потери стали | 10,0 | 0,9 |
| Известь | 78 | 7,0 | Шлак | 143,0 | 12,9 |
| Кокс | 4 | 0,4 | Газы | 40,2 | 3,6 |
| Электроды | 5 | 0,5 | Неувязка | 13,2 | 1,2 |
| Кислород | 20,4 | 1,8 |  |  |  |
| Итого | 1107,4 | 100 | Итого | 1107,4 | 100 |

**ТЕХНОЛОГІЇ ЭЛЕКТРОПЛАВКИ СТАЛІ**

**Варіанти технології електроплавки сталі**

Об'ємно-планувальні рішення ЕСПЦ в першу чергу визначаються заданим сортаментом сталей і обраною технологією їх виробництва. З усього різноманіття технологічних процесів одержання електросталі можна виділити наступні:

1. *Переплав легованих відходів з продувкою ванни киснем.* Мартенівський сортамент конструкційних маловуглецевих і вуглецевих сталей виплавляють одношлаковим процесом. Електропічний сортамент – нержавіючі, підшипникові, електротехнічні, швидкорізальні та ін. спеціальні сталі – виплавляють, як правило, двохшлаковим процесом;
2. *Плавка електросталі «на свіжій шихті»* – *з використанням рядового сталевого брухту і вуглецевих відходів з повним окисленням.* Електропічний сортамент і леговані конструкційні сталі мартенівського сортаменту виплавляють двохшлаковим процесом; вуглецеві сталі – одержують одношлаковим процесом.
3. *Плавка електросталі на шихті з металізованих окатишів і власних легованих відходів.* Цей метод застосовується при виплавці високолегованих марок сталей, до яких пред'являються підвищені вимоги по домішках кольорових металів. Звичайно, це трансформаторні, електротехнічні сталі, ряд марок малолегованих і вуглецевих сталей.
4. *Технологія вищого рівня* – одержання сталі дуплекспроцесом: дугова сталеплавильна піч (ДСП) – агрегат комплексної обробки стали (АКОС).

Перші три технологічних варіанти досить докладно викладено в навчальній і технічній літературі по електроплавці сталі. Тому ми не будемо зупинятися на фізико-хімічних особливостях кожного процесу або його окремих періодах, а охарактеризуємо лише коротенько технологічний регламент, властивий цим трьом технологіям.

Взагалі технологія виплавки сталі в дугових електропечах незалежно від виду застосованої футеровки, джерела живлення постійного або змінного типу, а також марки сталі включає періоди плавки, які характеризуються роботою печі під струмом і безструмної заборгованості печі. Якщо раніше ми оперували поняттям «тривалість плавки», то останнім часом виник термін «тривалість циклу плавки». Перший термін відноситься до роботи ДСП з повним випуском всіх продуктів після кожної плавки і тривалість плавки (Тпл) визначається як сума тривалості всіх періодів плавки плюс міжплавочні простої.

Тпл = tз + tзав + tок + tвід + tв + tпр, хв,

де: tз, tзав, tок, tвід, tв, tпр – тривалість відповідно заправки, завалки, окисного, відновного періодів, випуску і простоїв у проміжках між кінцем випуску і початком заправки. В табл.3.3 наведено усереднені показники тривалості періодів плавки для печей різної місткості для масового сортаменту сталей при організації двохшлакового процесу.

**Таблиця 3.3.** Тривалість періодів електроплавки сталі в ДСП

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Періоди плавки | Тривалість, хв. | | | | | | |
| Місткість печі, т | | | | | | |
| 6 | 12 | 25 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Заправка | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 12 | 15 |
| Завалка | 5 | 5 | 7 | 7 | 8 | 10 | 15 |
| Плавлення | 65 | 65 | 65 | 65 | 65 | 70 | 75 |
| Окисний | 20 | 20 | 20 | 30 | 35 | 35 | 35 |
| Відновний | 60 | 60 | 60 | 60 | 65 | 65 | 65 |
| Випуск | 5 | 5 | 5 | 5 | 7 | 8 | 8 |
| Простої | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Загальна | 163 | 167 | 169 | 179 | 191 | 203 | 215 |

*Заправка печі.* Після випуску з печі металу і шлаку піч очищають від залишків металу і шлаку і проводять заправку укосів печі сипучими матеріалами в суміші зі зв'язкою, в якості якої найчастіше застосовують рідке скло. При порушенні футеровки подини проводять її наварку, шляхом подачі на ушкоджені місця заправних вогнетривких матеріалів. На малих печах заправка ведеться вручну, на великих печах, місткістю 50 т і більше, заправку ведуть за допомогою заправних машин. В печах з еркерним випуском сталі після кожної плавки ведуть заправку верхньої частини укосів, а після кожного циклу (15-20 плавок) піч спорожняють, подину очищають від залишків металу і шлаку та проводять заправку подини звичайним способом. Такий режим роботи печі дозволяє значно скоротити середній час заправки печі.

*Завалка шихти.* При використанні металовідходів власного виробництва з насипною масою 1,4-1,8 т/м3 завалку печі ведуть в один прийом. Однак, при застосуванні амортизаційного брухту з насипною масою 0,8-1,2 т/м3 завалку ведуть у два-три прийоми з підвалками після часткового проплавлення першого кошика. В цьому випадку дають 70-75% кускового брухту, до 10% чавуну, до 15-20% стружки дробленого і пакетованого легковагого брухту. Останнім часом на багатьох заводах застосовують замість частини металобрухту до 50-80 % металізованих окатишів, які завантажують в піч на металобрухт або в розплав через склепіння безупинно або періодично. На заводах з повним циклом останнім часом в якості металевої складової шихти застосовують рідкий чавун. Питання виплавки сталі з використанням рідкого чавуну будуть розглянуті далі.

*Період розплавлення шихти.* Після завалки основної металошихти піч вкривають склепінням, опускають електроди і приступають до розплавлення металобрухту. При цьому електроди опускаються долілиць, прорізаючи колодязі в шихті і метал стікає на подину. При досягненні електродами розплаву горіння дуг стабілізується. Для інтенсифікації плавлення в піч подають кисень для підрізки брухту і додаткового нагріву розплаву. Останнім часом для вирівнювання фронту плавлення і підвищення швидкості плавлення в холодних зонах печі встановлюють паливно-кисневі пальники. З метою використання максимальної потужності трансформатора при проплавленні основної частини металошихти, коли дуги оголюються і не екрануються, наводять спінені шлаки за рахунок вдмухування в шлаки порошкоподібних вуглецевих матеріалів. Ці технологічні прийоми властиві для технології вищого рівня і будуть розглянуті більш докладно далі. У класичній технології одночасно з металошихтою в піч дають шлакоутворюючі, що сприяє протіканню процесу дефосфорації ще до закінчення повного розплавлення шихти, коли температура розплаву невисока. По закінченню періоду плавлення беруть пробу металу і приступають до окислювального періоду.

*Окислювальний період плавки.* В цей період проводять дефосфорацію металу, видаляють гази і неметалеві включення, здійснюють підігрів металу і вирівнюють його температуру. Для реалізації цих технологічних операцій наводять окисний високоосновний шлак, ведуть продувку ванни киснем з метою окислення вуглецю з утворенням пухирців моноокису вуглецю, що сприяє кипінню ванни, прискорюючи тим самим дефосфорацію і дегазацію металу від водню і азоту, які видаляються разом з пухирцями моноокису вуглецю. Процес кипіння сполучають з постійним відновленням шлаків за рахунок присадки шлакоутворюючих і мимовільного сходу шлаків через поріг робочого вікна. Кратність шлаків окислювального періоду дорівнює 0,02-0,04. Для забезпечення умов дефосфорації і дегазації металу досить окислити 0,3-0,5 % С. Для скорочення періоду процес дефосфорації сполучають з кінцем періоду плавлення. По закінченні окисного періоду беруть пробу металу і скачують практично повністю окисні шлаки.

*Відновлювальний період плавки.* Відновлювальний період плавки в основній ДСП починається з наведення високоосновних беззалізистих шлаків за рахунок присадки вапна, плавикового шпату і бою шамотної цегли. Для забезпечення необхідних умов десульфурації проводять одночасне видалення кисню за рахунок дифузійного, глибинного або комбінованого розкислення металу шляхом присадки розкислювачів-порошків коксу або феросиліцію на шлак та феромарганцю і феросиліцію в кусках у глибину металу. Остаточне розкислення проводять високоактивними елементами – алюмінієм, кальцієм у чистому виді або у вигляді сплавів шляхом введення кускових матеріалів або порошкового дроту в піч або в ківш на випуску сталі. Доведення до заданого хімічного складу здійснюється добавкою феросплавів у піч або в ківш. Тривалість відновлювального періоду визначається маркою виплавленої сталі. Кратність шлаків відновного періоду становить 0,03-0,06.

*Випуск сталі.* Спосіб випуску сталі в ківш визначається, насамперед, конструкцією ДСП, а також наявністю шумозахисного кожуха. При використанні ДСП звичайної конструкції випуск сталі через звичайний жолоб проводиться в ківш, підвішений на крюку крана з подальшою позапічною обробкою сталі, передбаченою технологічним регламентом. Вибір способу позапічної обробки визначається маркою сталі та технологією її виробництва і більш детально буде розглянуто в окремій главі.

Відповідно до норм технологічного проектування основні показники розробляються для двох груп печей: 1 – для печей місткістю 6-25 т; 2 – для печей місткістю 50-150 т. Для печей першої групи розробляється класичний процес у ДСП з цегельною футеровкою, які працюють тільки з використанням тепла дуг із застосуванням кисню для підрізування металобрухту і продувки ванни киснем, з реалізацією в ДСП всіх необхідних технологічних операцій двохшлаковим процесом, який включає окислювальний і відновлювальний періоди і часткову позапічну обробку.

В табл. 3.4 і 3.5 наведено тривалість класичного процесу електроплавки сталі і питомої витрати матеріалів та енергії по нормах технологічного проектування для печей першої групи.

**Таблиця 3.4.** Тривалість окремих періодів плавки в дугових сталеплавильних печах першої групи ( г-хв.)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показники | Місткість печі, т | | |
| 6 | 12 | 25 |
| Заправка | 0-10 | 0-10 | 0-15 |
| Завалка | 0-05 | 0-05 | 0-05 |
| Підвалка | - | - | - |
| Перепуск і нарощування електродів | 0-05 | 0-05 | 0-05 |
| Розплавлення | 1-05 | 1-05 | 1-20 |
| Окислення і нагрів металу | 0-10 | 0-10 | 0-20 |
| Рафінування | 0-55 | 0-55 | 0-50 |
| Випуск | 0-05 | 0-05 | 0-05 |
| **Загальна тривалість плавки** | **2-35** | **2-35** | **3-00** |

**Таблиця 3.5.** Питома витрата матеріалів і електроенергії для печей першої групи

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Найменування показників | Одиниця  виміру | Місткість печі, т | | |
| 6 | 12 | 25 |
| Електроди графітовані | кг/т | 5,3 | 5,3 | 5,3 |
| Вапно | - « - | 60 | 60 | 60 |
| Залізна руда | - « - | 20 | 20 | 20 |
| Плавиковий шпат | - « - | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| Електроенергія:   * на технологічні потреби * на газоочистку * на загальноцехові потреби | кВт⋅г/т | 650  46  23 | 600  46  28 | 555  45  14 |
| Кисень | м3/т | 14 | 14 | 14 |
| Вода | м3/т | 28 | 22 | 20 |
| Стиснене повітря | м3/т | 33 | 23 | 16,5 |
| Шлакові чаші | шт | 0,8 | 0,6 | 0,5 |

Для печей другої групи (50, 100, 150 т) (табл. 3.6-3.11) норми встановлено для умов роботи на холодному брухті, із застосуванням газоподібного кисню і газокисневих пальників, одношлаковим процесом з виносом процесів для доведення сталі в агрегати комплексної обробки сталі (АКОС) з безшлаковим випуском металу, з розливкою на МБЛЗ. Застосовують печі з елементами склепіння і стін, які водоохолоджуються, ексцентреним випуском сталі в ківш, встановлений на сталевозі, завантаженням сипучих матеріалів зверху через п'ятий отвір у склепінні, установкою печей у димошумоізолюючих камерах. Завантаження брухту здійснюється у два прийоми. Доставка брухту в контейнерах і насипом, з корегуванням магнітними кранами. Заправка укосів і стін печі здійснюється машинами двох типів: центробіжною, яка вводиться в піч краном через верх, і пневмомеханічною, з подачею матеріалу через робоче вікно. Заправка здійснюється периклазовим порошком зі спецдобавками.

**Таблиця 3.6.** Тривалість окремих періодів плавки в дугових сталеплавильних електропечах другої групи (г-хв)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Найменування періодів плавки | Місткість електропечі, т | | |
| 50 | 100 | 150 |
| Заправка | 0-03 | 0-03 | 0-04 |
| Завантаження першого кошика | 0-03 | 0-03 | 0-04 |
| Заміна і перепуск електродів | 0-04 | 0-04 | 0-05 |
| Плавлення першого кошика | 0-20 | 0-20 | 0-20 |
| Завантаження другого кошика | 0-05 | 0-05 | 0-06 |
| Доплавлення | 0-25 | 0-30 | 0-35 |
| Контроль і доведення металу | 0-20 | 0-20 | 0-20 |
| Випуск | 0-05 | 0-05 | 0-06 |
| Тривалість плавки від випуску до випуску, година-хвилина | 1-25 | 1-30 | 1-40 |

Нарощування електродів проводиться за допомогою спеціального пристрою на стендах, перепуск електродів – на відверненому склепінні. Електроди – графітовані, з припустимою щільністю струму – 28-35 А/см2. Печі оснащено трьома газокисневими пальниками, встановленими в стінці кожуха печі між електродами і працюючими в початковий період кожної з двох завалок. Подача кисню у ванну печі здійснюється через робоче вікно, через стінку і подину печі. Вимір температури і взяття проб здійснюється механізованим пристроєм за допомогою змінних блоків. Доставка проб у лабораторію пневмопоштою.

**Таблиця 3.7.** Питома витрата матеріалів, енергоносіїв і води в електросталеплавильних цехах другої групи на 1 т рідкої сталі

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Найменування показників | Місткість печі, т | | |
| 50 | 100 | 150 |
| Графітовані електроди, кг | 5,0 | 5,0 | 5,0 |
| Електроенергія, кВт⋅год:   * на виплавку * на загальноцехові витрати | 500  10 | 480  8 | 470  7,5 |
| Кисень, м3:   * на виплавку рядової сталі * на виплавку нержавіючої сталі з наступною обробкою на агрегаті аргоно-кисневого рафінування * на газокисневі пальники * на загальноцехові потреби | 15  5  10  0,04 | 15  5  10  0,04 | 15  5  10  0,04 |
| Стиснене повітря на загальноцехові потреби, м3 | 14,5 | 12 | 11 |
| Природний газ на газокисневі пальники, м3 | 5 | 5 | 5 |
| Природний газ на загальноцехові потреби | 9,1 | 8,3 | 7,7 |
| Тепло на опалювальні потреби, ГДж  Ккал | 0,097  23000 | 0,059  14000 | 0,038  9000 |
| Вода, м3:   * на технологічні потреби * на загальноцехові потреби | 20  19 | 16  13 | 14  20 |

**Таблиця 3.8.** Питома витрата вогнетривких матеріалів на ремонт і заправку дугових сталеплавильних електропечей, кг/т рідкої сталі

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Найменування матеріалів | Місткість печі, т | | |
| 50 | 100 | 150 |
| Цегла мулітокорундова термоантрацитова для футеровки склепіння | 0,33 | 0,24 | 0,21 |
| Цегла периклазовуглецева або периклазохромітова для футеровки стін | 0,42 | 0,36 | 0,35 |
| Цегла периклазова для футеровки подини | 0,35 | 0,33 | 0,31 |
| Порошок периклазовий дрібнозернистий для заправки і торкретування | 5,0 | 4,6 | 4,0 |
| Порошок доломітовий обпалений дрібнозернистий для порогів | 3,0 | 2,5 | 2,0 |

**Таблиця 3.9.** Відходи і втрати металу в електросталеплавильних цехах з печами другої групи, кг/т рідкої сталі

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вигар в електропечі | Скрап у розливочному ковші | Відходи при розливці сталі у виливниці | | | |
| Для злитків масою | | | недоливи |
| до 2 т | 2,1-6 т | понад 6 т |
| 100 | 3 | 20 | 16 | 8 | 25 |

**Таблиця 3.10.** Питома витрата змінного устаткування для цехів другої групи, кг/т рідкої сталі

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Місткість печі, номінальна, т | кг | | Продувні кисневі трубки, погонний м | | Змінні вимірювальні блоки, шт | |
| Шла-кові чаші | Шиберні затвори (метал.) | з вогнетривким покриттям | без покриття | для виміру температури | для взяття проб |
| 50 | 0,4 | 0,020 | 0,30 | 0,90 | 0,08 | 0,03 |
| 100 | 0,3 | 0,018 | 0,15 | 0,45 | 0,04 | 0,03 |
| 150 | 0,3 | 0,012 | 0,10 | 0,30 | 0,03 | 0,03 |

**Таблиця 3.11.** Питома витрата вапна, плавикового шпату і коксу в електросталеплавильних цехах, кг/т рідкої сталі

|  |  |
| --- | --- |
| Найменування матеріалу | Питома витрата |
| Вапно | 60 |
| Шпат плавиковий | 3 |
| Кокс | 10 |

Футерована частина склепіння печі виконується з мулітокорундової, термоантрацитової або периклазохромітової цегли, стіни – з периклазовуглецевої або периклазохромітової цегли.

Застосовуються сталерозливочні ковші місткістю 70, 130 і 175 т з шиберними затворами, футеровані мулітокорундовою (робочий шар) і периклазографітовою (шлаковий пояс) цеглою.

**Технологія вищого рівня електроплавки сталі**

В міру розвитку способів позапічної обробки і освоєння нових агрегатів планується перехід на виплавку одношлаковим процесом всієї сталі.

Передбачається використання дугових печей переважно для розплавлення твердої шихти і окисного рафінування (зневуглецювання і дефосфорації) рідкого металу. Розкислювальне рафінування – легування, доведення сталі по температурі і хімічному складу, буде проводитися поза піччю, у сталерозливочному ковші, з використанням спеціальних агрегатів. Це дозволить значно підвищити продуктивність печі і поліпшити якість продукції. Нижче ми розберемо більш докладно концепцію технології вищого рівня.

Оцінка ефективності виробництва електросталі здійснюється по 3 параметрам: ***продуктивності, якості, вартості.***

В структурі собівартості електросталі значну частину займають витрати по переділу (до 60%), які, в свою чергу, розподіляються в такий спосіб (%): енергія – 43,6; електроди – 14,2; вогнетриви – 13,3; транспортні витрати – 11,7; обслуговування – 14,7; витрати виробництва – 2,5.

Орієнтуючись на ці показники в області електрометалургії сталі до теперішнього часу сформувалася концепція технології вищого рівня. Суть концепції зводиться до використання дугової печі для виплавки напівпродукту при максимальному прискоренні процесу розплавлення брухту і перенесенні операцій рафінування та доведення металу до заданих вимог в окремий агрегат.

*Сутність технології вищого рівня* складається в переході виплавки сталі від монопроцесу до дуплекс процесу: дугова піч – позапічний агрегат. Ця технологія характеризується наступними принципами:

1. Основний принцип: єдиною технологічною операцією, яка виконується в електропечі, є дефосфорація сталі, сполучена з плавленням шихти. Для її успішного проведення на залишок (болото) рідкого металу від попередньої плавки завантажують вапно, а разом з брухтом у бадді подається вапняк;
2. Продувка киснем і наявність вапняних основних шлаків у початковий період плавлення і відносно низька температура металу сприяють переходу фосфору в шлак. Самовільний схід шлаку через поріг печі і відновлення його за рахунок періодичної присадки шлакоутворюючих через склепіння прискорюють і полегшують процес дефосфорації;
3. Підтримка максимальної довжини дуг і максимальної їх потужності. Робота печі на підвищеній напрузі. Це забезпечується підтримкою заповненої печі (до 80%) у можливо тривалий період часу з підвалкою 1/3 частини шихти; створенням спінених шлаків за рахунок періодичної присадки шлакоутворюючих і вдмухування вуглецьвмісних матеріалів, що екранує дуги і охороняє футеровку склепіння і стін печі від високого теплового навантаження, створює на водоохолоджуємих панелях захисний гарнісажний шар;
4. Попередній підігрів брухту прискорює процес плавлення за рахунок фізичного тепла, внесеного металобрухтом, і завдяки кращим умовам горіння дуг;
5. Застосування паливно-кисневих пальників в «холодних» зонах печі забезпечує вирівнювання фронту плавлення по перетину печі, інтенсифікує процес, знижує витрату електроенергії і електродів;
6. Присадка навуглецювачів у свіжу шихту, на «болото» металу або інжекція вугільного порошку в сполученні з інтенсивною продувкою киснем протягом всього періоду плавлення знижують енерговитрати;
7. Інтенсивна продувка ванни киснем з орієнтуванням на припустимо-мінімальну концентрацію вуглецю в напівпродукті всіх марок сталей приводить до істотного скорочення циклу плавки і до виключення операції регулювання залишкового вуглецю в печі;
8. Забезпечення заданого складу і температури сталі проводиться у позапічних агрегатах, які виділяються в окремий проліт або будівлю. Підігрів і доведення по температурі проводиться в ковші-печі шляхом підведення потужності приблизно на порядок нижче, ніж у дуговій печі в період плавлення;
9. Позапічна обробка сталі з метою доведення до заданого хімічного складу і температури, а також вплив на морфологію неметалевих включень, повинна передбачати підігрів металу, вакуумну обробку, набір засобів для перемішування металу, присадку кускових і порошкових матеріалів;
10. Відсічення пічних шлаків, використання електродугових печей нового покоління, які дозволяють відсікати пічні шлаки і повністю запобігати його попаданню в ківш. Застосування, так званого, «сифонного випуску», коли випускний отвір розташовано нижче рівня металевого розплаву у ванні печі, або «донного» центрального і позацентреного (еркерного) випусків, які поряд з відсіченням шлаків дозволяють регулювати залишкове «болото» рідкого металу. Найбільш технічно досконалими є печі зі зміщеним донним випуском металу – еркерний випуск.

Однак, застосування цих заходів без органічного узгодження з організацією виробництва не може гарантувати досягнення високих показників. Підтвердженням тому може служити робота окремих цехів і заводів, які мають печі і технологію вищого рівня, однак не домоглися максимальних показників продуктивності.

**Шляхи подальшого вдосконалення технології електроплавки сталі**

За останні роки впроваджено ряд нових технологічних прийомів виплавки і конструктивних удосконалень дугових сталеплавильних печей, плазмена технологія підігріву металу в ковші і переробка пилу електропечей, переробка шлаків, впровадження печей з оптимізованими енергетичними параметрами, автоматизована система введення в ківш алюмінієвого дроту. Розроблено і впроваджено МБЛЗ продуктивністю 1200 тис. т/рік і МБЛЗ для одержання тонких слябів шириною 800-1000 мм, нова система струминного охолодження кристалізаторів водою низького тиску, що забезпечує вдвічі скорочення витрати води і зниження витрати кристалізаторів. Деякі з цих удосконалень докладно буде розглянуто далі.

***Плавка з використанням залишку розплаву від попереднього випуску***

Суть процесу полягає в тому, що при випуску сталі через сифонний жолоб або за допомогою донного випускного отвору в печі залишають частину металу. Зародившись, як запобіжний захід попадання шлаків у сталерозливочний ківш, цей технологічний прийом дозволив: інтенсифікувати введення потужності і за 1-2 хвилини вийти на її граничне значення; точно дозувати необхідну кількість розплаву, особливо при розливці у виливниці; полегшити і прискорити шлакоутворення в наступній плавці і тим самим стабілізувати горіння дуг; забезпечити подачу кисню з самого початку плавки.

Для огляду і ремонту подини, а також при переході на інший сортамент сталі, несумісний з попереднім, печі спорожняють повністю. Робота на рідкому «болоті» підвищує середню споживану потужність за рахунок відсутності обмежень у початковий період плавки, підвищує стійкість подини, знижує теплові втрати, зменшує загальний час циклу плавки.

***Робота ДСП зі спіненими шлаками***

Висока продуктивність дугової електропечі досягається, насамперед, за рахунок різкого збільшення потужності, яка вводиться, використання брухту з відносно малою насипною масою, підтримки максимальної напруги на дузі (тобто робота з довгими дугами при мінімально припустимій силі струму) при належній технологічній стійкості основних елементів печі і, насамперед, стін і склепіння печі

До деякої міри рішенню цих задач сприяє застосування водоохолоджуємих елементів стін і склепіння печі. Однак, рішучу роль грає все-таки створення умов для максимального використання енергії дуги на нагрівання металу і шлаку.

Для зниження негативного впливу відкритих дуг на стійкість водо охолоджуємих і вогнетривких елементів робочого простору ДСП і підвищення ефективності теплопередачі від дуги до металу необхідно забезпечити екранування електричної дуги за рахунок занурення її в метал або в шлак. Умови екранування дуг металом або шлаком визначаються різними факторами. Для вибору варіанта екранування дуг приведемо порівняння глибини занурення дуг при тих самих параметрах живильного струму.

*Екранування дуг зануренням у метал.* Електромагнітна сила дуги визначається з рівняння:

 (3.1)

де: μо – магнітна проникність;

I – сила струму дуги;

R – радіус електрода або стовпа дуги;

r – умовний радіус точкового значення струму; змінюється від 0 до R.

Тиск дуги на метал можна визначити з виразу:

, (3.2)

де: Fд – сумарна сила тиску дуги, Н;

S – площа плями дуги, см2;

γ – щільність рідкої сталі, кг/см3;

h – глибина занурення дуги, см, визначається з виразу:

, см. (3.3)

Якщо прийняти струм дуги великої ДСП рівним 50 кА, а щільність струму в катодній плямі 500 А/см2, що відповідає радіусу холодної плями 5,7 см, то сила тиску на розплавлений метал буде дорівнює 125 Н. Відповідно до рівняння (3.1) максимальний тиск поблизу осі дуги буде дорівнювати 2,5⋅104 Н/м2. Тоді глибина занурення дуги становить порядку 150 мм. В дійсності в потужних ДСП під стовпом дуги на поверхні сталі утворюється помітний увігнутий меніск. Однак, при підвищенні напруги і збільшенні загальної потужності ДСП цього недостатньо, щоб забезпечити екранування дуги і створити умови для максимальної передачі тепла металу і шлаку.

*Екранування дуг шлаком.* Коефіцієнт екранування

,

де hкип – висота підйому рівня шлаку при кипінні, см;

*l*д – довжина дуги, см.

Приймемо, що дуга повинна бути повністю екранована шлаком. При цьому hкип = *l*д і fе = 1. Тоді інтенсивність присадки шлакоутворюючих для цих умов буде визначатися з виразу:

, кг/хв,

де k = 5⋅ 10-4, оС/хв⋅кА⋅МВт∙т (на 1 т коші);

qш – кількість шлаку на 1 т завалки, кг;

GМе – місткість печі, т;

Iд – сила струму дуги, кА;

Рд – потужність дуг, МВт;

Δt – інтервал температур нагрівання металу, оС.

Для місткості GМе = 100 т, витрати шлакоутворюючих qш = 50 кг/т; силі струму Iд = 50 кА, при нагріванні металу від 1550 до 1630оС (Δt = 80оС) і потужності дуги Рд = 45 МВт інтенсивність подачі шлакоутворюючих буде становити:

Иш = 5⋅ 10-4⋅50⋅100⋅50⋅45/80 = 70,3 кг/хв;

При цьому довжина дуги, яка екранована шлаком, буде *l*д = 600 мм.

Повне екранування дуги шлаками може забезпечити досить високу ефективність використання електричної енергії для нагрівання металу і шлаку. Робота печі на спіненому шлаку, дозволяє довести коефіцієнт використання енергії дуги до 65-93%, проти 36%. Якщо дуга наполовину своєї довжини або повністю занурена в шлак, то випромінювана дугою енергія буде передаватися ванні металу приблизно на 63% або на 93% відповідно.

*Умови спінювання шлаків.* Основними факторами, які оказують вплив на утворення пінистих шлаків є кількість газів, що утворюються, в результаті зневуглецювання і фізико-хімічні властивості шлаків (склад, температура, в'язкість, поверхневий або міжфазний натяг). Для підтримки шлаків у спіненому стані необхідна підвищена витрата шлакоутворюючих, висока основність шлаків (не менш 1,7), постійне вдмухування кисню і наявність високого вмісту вуглецю в металі (більше 0,8%) або вдмухування навуглецювача в шлак. Економія досягається 10-30 кВт⋅г/т рідкої сталі.

Найбільш перспективним для підтримки спінених шлаків є використання металізованої сировини, яка містить вуглець і кисень і, яка вводиться рівномірно у ванну печі. При високопотужній швидкісній електроплавці необхідно екранування дуг для підвищення енергетичного ККД і зниження теплових втрат. Плавка в режимі довгих дуг, екранованих пінистими шлаками, можлива, якщо піч обслуговується маніпулятором, або в цеху є бункерна естакада для подачі в піч шлакоутворюючих і порошкоподібного вугілля. Там, де цього нема, плавка повинна проводитися в режимі коротких дуг, заглиблених у розплав. Обидва способи застосовують залежно від типу і рівня обслуговування печей.

Робота зі спіненими шлаками є обов'язковою в сучасних електросталеплавильних комплексах для зниження витрати електроенергії, електродів, скорочення простоїв, зменшення витрат. Економія витрати електроенергії досягається завдяки кращій передачі тепла конвекцією через шар шлаку в системі шлак-метал, частковому нагріванню опором, введенню додаткового тепла за рахунок окислення вуглецю киснем, який вдмухається в піч з витратою 25-30 нм3/т. Інтенсивному спінюванню шлаку, особливо, сприяє спільне вдмухування кисню з порошкоподібними високовуглецевими матеріалами.

Наприкінці плавлення, коли дуги не екрановано металошихтою, необхідно обмежити випромінювання тепла на стіни і футеровку стін і склепіння, які водоохолоджуються. Для цього знижують напругу. Однак, підтримка введеної потужності за рахунок підвищення струму приводить до додаткової витрати електродів. Наявний у печі шлак не забезпечує екранування дуг і тому різко падає коефіцієнт корисного використання тепла дуги. Необхідно максимально екранувати дуги шляхом спінювання шлаку, щоб виключити втрати тепла і забезпечити повне використання потужності трансформатора. Перегрів шлаку викликає його спінювання за рахунок кипіння. Перемішування на границі розділу метал-шлак забезпечує інтенсивне зневуглецювання і підвищує теплову віддачу дуги металу. Спінювання шлаку необхідно забезпечувати наприкінці періоду плавлення, коли ще в печі є залишки шихти, що не розплавилася. Одночасно введення кисню і вуглецю дозволяють проводити процес зневуглецювання металу і спінювання шлаку. При цьому кисень необхідно вдмухувати за допомогою фурми безпосередньо в метал, а вуглець за допомогою інжекторів шляхом зміни кута нахилу фурми. Продувку необхідно здійснювати при температурах металу від 1550 до 1680оС до досягнення вмісту вуглецю в металі 0,15-0,05%. Вміст Fe у шлаку коливається від 8 до 28% при його основності CaО/SiО2 ≈ 2. Необхідно забезпечувати постійне вдмухування вуглецю з витратою близько 0,3 кг/хв⋅т, щоб одночасно забезпечити зневуглецювання сталі і попередити створення надмірно окислених шлаків, за рахунок накопичення в ньому оксидів заліза. Процес одночасної подачі кисню і вуглецю повинно бути оптимізовано таким чином, щоб кисень повністю витрачався на окислення вуглецю металу до заданих меж, а вуглець, який вдмухається, повністю витрачався на відновлення оксидів заліза, забезпечуючи в шлаку їх вміст на рівні 11-15%. При цьому процес відновлення оксидів заліза повинен випереджати їх надходження (тобто окислення), що дозволить скоротити загальну кількість шлаку і знизити втрати металу на вигар. Співвідношення між витратою вуглецю і кисню вибирається залежно від необхідного вмісту вуглецю в металі наприкінці продувки.

Спінювання шлаків обмежує теплове навантаження на стіни і склепіння печі, створює можливість підведення максимально можливої потужності в ДСП, збільшує продуктивність агрегату, знижує втрати металу зі шлаком. Забезпечуючи інтенсивність спінювання шлаку можна підвищити корисне використання тепла дуги до 70-80% проти 50% при звичайній плавці. Коефіцієнт використання тепла дуги можна визначити з рівняння:

ΔНпер = р(Е – r) + ΔНС + ΔНFe  – В,

где: ΔНпер – тепло на перегрів сталі;

р – коефіцієнт використання тепла дуги;

ΔНС – ентальпія реакції С + 1/2О2 → СО;

ΔНFe – ентальпія реакції Fe + 1/O2 → FeО;

В – втрати тепла піччю;

Е – введена електрична потужність;

r – електричні втрати при дуговому режимі.

Крім всього іншого, регулюючи співвідношення введених вуглецю і кисню (С/О2), можна підтримувати вміст оксиду заліза в шлаку менш 20%, знижуючи при цьому вміст вуглецю в сталі до 0,025%. Шлак, який містить таку кількість FeО, має хорошу дефосфоруючу здатність. З іншого боку, окислення марганцю і хрому обмежено вдмухуванням вуглецю, що забезпечує економію феросплавів.

Таким чином, робота ДСП із вдмухуванням кисню і вуглецю в заданому співвідношенні наприкінці окислювального періоду дозволяє регулювати вміст оксидів заліза в шлаку і вуглецю в металі та забезпечує ефективне спінювання шлаку, при якому досягаються наступні результати: заощаджується 20-30 кВт⋅г/т рідкої сталі; збільшується вихід сталі до 2%; знижується витрата феромарганцю і ферохрому на 0,3-0,5 кг/т рідкої сталі; знижується підсмоктування повітря в ДСП і зменшується кількість неорганізованих викидів газу.

**Застосування альтернативних джерел енергії**

В ході розвитку технології вищого рівня функції газоподібного кисню значно розширилися – разом із завданнями окислення домішок головним стало прискорення розплавлення шихти і нагрівання ванни.

Застосування кисню в сполученні з газоподібним або твердим паливом сприяє вирівнюванню фронту плавлення, прискоренню теплообміну ванни, яка наплавляється за рахунок підтримки процесу кипіння і допалення газів СО і Н2. Змінилися і способи введення кисню в піч. В період плавлення його подають через сталеві трубки, які укладаються на шихту, через паливно-кисневі пальники. Доплавлення і нагрівання ведуть за допомогою водоохолоджуємих склепінних або стінових фурм, є технічні рішення подачі кисню через подину.

Сумарна витрата кисню на кращих західноєвропейських печах досягає 30-40 м3/т. Кожний витрачений 1 м3 кисню на тонну сталі забезпечує скорочення тривалості плавки на 1-1,5 хв при відповідному зниженні витрати електроенергії. Кисень необхідний також для створення спінених шлаків. Однак, введення кисню найбільш ефективно у сполученні з вуглецьвмісними матеріалами, що забезпечує найбільш бажані результати з погляду металургійних і енергетичних процесів.

Тому далі ми більш детально проаналізуємо вплив способу введення вуглецю і кисню на енергетичні та металургійні процеси електроплавки сталі.

***Подача вуглецевих матеріалів у ДСП***

Це питання необхідно розглядати в трьох аспектах: способи подачі вуглецю в ДСП і можливі шляхи або механізм взаємодії вуглецю; допалення газу СО до СО2; вплив газів, які виділяються, на спінювання шлаків і підвищення коефіцієнта використання енергії електричної дуги. Останній аспект ми обговорили в попередньому параграфі.

Введення вуглецю в сталеплавильну ванну може здійснюватися декількома способами: зверху завалки шихти через п'ятий отвір у склепінні; разом з металошихтою у бадді (можливо у вигляді чавуну); вдмухування порошкоподібних вуглецьвмісних матеріалів фурмою через робоче вікно печі або через стінові інжектори. Спосіб введення вуглецю в піч визначає його коефіцієнт використання.

Вуглець, який подається через п'ятий отвір у склепінні, горить за рахунок кисню, який вдмухається, і кисню повітря, в основному, у верхній частині печі. Більша частина теплової енергії, яка при цьому виділяється, йде з газами, які відходять, і ефект навуглецювання практично нульовий.

Вуглець, який подається разом з металошихтою або, який вдмухається в піч інжекторами, горить, в основному, за рахунок кисню, який вдмухається в піч всередину шару шихти або в метал. Кількість газів, які виділяються, оцінено за аналізом СО, при цьому відповідають кількості кисню, який вдмухається, і корегує з витратою вуглецю по реакції:

С + ½ О2 → СО.

В той же час вуглець, який подається через склепіння, горить за рахунок кисню, який подається фурмою, і кисню повітря.

Вуглець, який подається разом з металобрухтом, витрачається на горіння, переходить у метал до вмісту його на рівні 0,15-0,20% наприкінці плавлення і дуже незначна його частина находиться в шлаку. Однак, при розгляді балансу варто враховувати вуглець електродів, шихти і подини. Кисень, який вводиться в піч, чи то фурмами, чи то повітрям, витрачається на окислення вуглецю (реакційний кисень). Друга частина (не бере участь в реакції – нереакційний) тільки нагрівається. Баланс вуглецю і кисню виплавки вуглецевої сталі наведено в табл. 3.12.

**Таблиця 3.12.** Баланс вуглецю і кисню наприкінці періоду плавлення електроплавки сталі в печі місткістю 6 т

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Прихід | | Витрата | |
| Вуглець, кг/т:  Кокс  Брухт  Графітований електрод  Подина печі | 8,1  2,3  2,2  0,1 | Газ, який відходить  Метал (0,45% С)  Шлак  Нев'язка | 8,5  4,5  0,5  -0,8 |
| Всього вуглець: 12,7 | | 12,7 | |
| Кисень, нм3/т:  який подається повітрям  який вдмухається кисневими фурмами | 11,9  6,5 | Реакційний кисень  Нереакційний кисень  Нев'язка | 13,5  4,4  +0,5 |
| Всього кисень 18,4 | | 18,4 | |

Нев'язка в балансі кисню визначає стан окислення або відновлення шихти. Якщо різниця позитивна – шихта окисляється в період плавлення, якщо різниця негативна – шихта відновлюється. Окислювальному процесу відповідає більш висока ступінь вторинного горіння (ηв.г.) по реакції:

СО + 1/2О2 → СО2,

обумовлена відношенням:

.

Для окислення вуглецю запропоновано наступний механізм:

* первинне горіння вуглецю здійснюється за рахунок кисню, який вдмухається фурмами в шихту, по реакції:

С + 1/2О2(ф) → СО, ΔН = -2,25 кВт⋅г/кг С;

* вторинне горіння здійснюється за рахунок кисню повітря, який находиться у верхній частині печі, по реакції:

СО + 1/2О2(п) → СО2, ΔН = -6,55 кВт⋅г/кг С.

Передача тепла до металу і шлаку при цьому дуже низька. Однак, склепіння печі і система, яка відводить гази, піддаються тривалим високим тепловим навантаженням.

Окислення порошкоподібного вуглецю, вуглецю рідкого металу з утворенням газів СО і СО2 іде з виділенням тепла і компенсує частину енергетичних витрат, що ілюструється наступними реакціями:

2Ств + {О2} → {СО}, -2,7 кВт⋅г/нм3О2

2{СО} + {О2} → 2{СО2}, -1,8 кВт⋅г/нм3О2

[С] + {О2} → {СО2}, -4,9 кВт⋅г/нм3О2

[Fe] + {CО2} → (FeО) + {СО}, -6,5 кВт⋅г/нм3О2.

Окислення вуглецю газом СО2 іде з поглинанням тепла і вимагає додаткових витрат енергоресурсів:

{CО2} + [С] → 2{СО}, + 1,5 кВт⋅г/нм3О2

Однак, ці витрати незначні в загальному балансі. В сучасних ДСП прихід енергії за рахунок тепла хімічних реакцій становить 150-200 кВт⋅г/т. Тому його використання повинно бути враховано при розробці раціональних технологій виробництва сталі і конструкції печі.

Тепло реакції окислення вуглецю, який вміщується у ванні (~0,2%), до СО становить 5,6 кВт⋅г/т, а до СО2 додатково ще 10 кВт⋅г/т. Окислення вуглецю, який вдмухається в ДСП, дає 50-100 кВт⋅г/т додаткової енергії. Крім того, додаткова енергія в кількості ~30 кВт⋅г/т надходить в результаті окислення кремнію, марганцю, заліза по реакціях при температурі 1630оС:

[Si] + {O2} → (SiО2), -9,44 кВт⋅г/нм3О2

2[Mn] + {O2} → 2(MnО), -14,5 кВт⋅г/нм3О2

2[Fe] + {O2} → 2(FeО), -2,7 кВт⋅г/нм3О2.

Для проведення цих екзотермічних реакцій в піч подається кисень за допомогою фурм або подових пористих пробок. Теоретична потреба кисню в цьому випадку становить 4-7 м3/т і залежить від вмісту вуглецю у ванні і швидкості процесу окислення елементів. Практичне споживання кисню досягає 20-40 нм3/т, що сприяє зменшенню споживання електроенергії на 5-10 кВт⋅г/нм3 кисню і збільшенню продуктивності печі.

В якості навуглецювача в ДСП використовується кокс, електродний бій, мелений антрацит, карбід заліза і чавун. На співвідношення СО/СО2 у виділеному газі впливає витрата кисню для продувки, спосіб його подачі (у рідку ванну або над її поверхнею), спосіб захисту електродів, допалювання СО за допомогою пальників. Ефективність передачі тепла металевій ванні під час допалюваня СО становить 30-40%; холодній шихті 50-60%; максимальна ефективність (80-90%) може бути досягнута в шахтній печі.

В сучасних ДСП в якості вуглецьвмісного палива застосовується вугільний пил, мазут або природний газ. Ці види палива подаються безпосередньо в розплав через фурми, розташовані в бічній стінці печі на рівні завантажувального вікна. Окислення відбувається в області рідкої ванни або шлаку, що забезпечує високу ефективність згоряння. При використанні в ДСП додаткового паливного нагрівання коефіцієнт корисного використання енергії нижче у два рази в порівнянні з використанням тільки електроенергії, що обумовлено низьким ККД (20-60%) газових пальників.

Застосування палива для попереднього підігріву брухту має обмежену ефективність, тому що з ростом температури брухту (вище 350оС) ККД нагрівання зменшується. Крім того, відбувається окислення значної кількості металу.

***Застосування паливно-кисневих пальників***

Для прискорення рівномірного плавлення всього об'єму металошихти використовують паливно-кисневі пальники (ПКП), сумарна потужність яких досягає 20% встановленої потужності пічного трансформатора. Слід зазначити, що в надпотужних ДСП природний газ найбільш широко використовують країни Європи, близько розташовані до джерела дешевого природного газу. Тим часом, природний газ доцільніше спалювати в спеціальних агрегатах – теплових котлах, де реалізуються високі значення теплового ККД (на відміну від робочого простору дугових печей). Економія електроенергії від застосування ПКП не перевищує 100-150 кВт⋅г/т. В той же час тепломісткість рідкого чавуну при 1300оС, оптимальна частка якого в металошихті становить 35%, дорівнює практично тій же величині – 100 кВт⋅г/т.

В зв'язку з цим раціональним представляється використання газокисневих пальників при роботі з двох режимів; один – для інтенсивного плавлення брухту, інший – для допалювання СО.

Паливно-кисневі пальники необхідно використовувати відразу після початку плавки (чим більше шихти і вона холодніша, тим вище буде ККД пальників) для розплавлення брухту і вони повинні працювати тільки доти, поки в печі є шихта, що не розплавилася.

Сучасна технологія передбачає: продувку ванни дугової печі киснем або інертним газом через 3-6 фурм, розміщених у подині; трьома-п'ятьма кисневими фурмами, встановленими в стінах печі; використання 3-4 газокисневих пальників. Найбільша кількість вуглецьвмісних матеріалів завантажується разом з шихтою, а після наплавлення ванни в неї вдмухують тонкоподрібнене вугілля. При цьому забезпечується економія електроенергії 4-5,5 кВт⋅г/т на кожний кілограм витраченого вугілля.

На 80-ти тонній печі вдмухування вугілля дозволяє скоротити тривалість плавки з 105 до 70 хв. (у т.ч. період плавлення – з 84 до 58 хв.), питому витрату електроенергії з 527 до 362 кВт⋅г/т, збільшити продуктивність печі з 326 до 433 тис.т/рік. Витрата вугілля становить 32 кг/т, споживання кисню 69 м3/т, проти 11 м3/т, інертного газу 6,6 м3/т. Однак, при використанні вугілля необхідно приділяти серйозну увагу питанням газовиділення і екології.

***Донна продувка ванни газами***

Для прискорення процесу рафінування сталі газ вводять у ванну ДСП через пористі керамічні вставки, зафутеровані в подину. Витрата коливається від 5 до 180 л/хв при тиску 0, 4-0,6 МПа (краще продувати газом СО2 або природним газом). Потужність перемішування пропорційна витраті газу, температурі металу, висоті його стовпа і зворотно-пропорційна масі металу і визначається призначенням продувки. При вакуумуванні і звичайному дуговому підігріву ванни досить мати потужність 40 Вт/м3; для прискорення флотації неметалевих включень і вирівняння температури та складу металу необхідно 120-150 Вт/м3; для дегазації і каолісценції неметалевих включень – 300-1000 Вт/м3. Ступінь десульфурації при донній продувці зростає з 4 до 28% і кінцева концентрація S досягає 0,002%, поліпшується також дефосфорація і зневуглецювання металу.

Результати плавок в печі місткістю 50 т з еркерним випуском сталі і установкою 2-х фурм показали, що витрата електроенергії знизилася на 19 кВт⋅г/т, електродів до 2 кг/т, концентрація кисню в сталі змінилася з 0,052 до 0, 041% і сірки з 0,043 до 0,008%.

Проблема локального перегріву розплаву в зоні дії електричних дуг при плавці сталі в потужних дугових печах постійно перебуває в центрі уваги сталеплавильників. Задача гомогенізації металу перед розливкою здебільшого вирішуються методами ківшевої металургії. Разом з тим теорією і практикою сучасного електросталеплавильного виробництва показано, що основа якісного металу безсумнівно закладається при плавці в ДСП. Для одержання чистої по неметалевим включенням сталі з низьким вмістом газів, швидкої і ефективної гомогенізації та прискорення масообмінних процесів все більше використовують донну продувку інертними газами в печі.

Необхідно відзначити, що донну продувку може бути ефективно реалізовано при роботі печі на рідкому болоті. Крім того, сама по собі донна продувка, без сполучення з основними ознаками технології вищого рівня (донний випуск, робота на «рідкому болоті», спінений шлак, попередній підігрів брухту, інтенсивна продувка чистим киснем і в суміші з пилоподібним і газоподібним вуглецевим паливом) не може забезпечити належного ефекту.

Існує кілька схем донної продувки сталі в печі, основними з яких є два типи: «пряма» продувка і «схована» продувка. На Білоруському металургійному заводі використовують обидві схеми, розроблені німецькою фірмою “Techcom” і австрійською “VRD” (Veitsel er-Radex-Didier AG). «Схована» система передбачає продувку через спеціальні пристрої подачі газу, які покриваються шаром газопроникної вогнетривкої маси. В кожусі днища печі монтуються спеціальні (сховані) продувні пристрої (трубки) для продувки металу газом. Послідовність операцій при підготовці подини ДСП під «сховану» донну продувку наступна. Після обладнання подини пристроями для підведення інертного газу виконується арматурна футеровка у два ряди на плашку периклазовими виробами розміру 250х125х76 мм. При цьому залишається чотири місця під вогнетривкі стакани для продувних пристроїв. Кільця опалубки цих склянок виготовляються з листової сталі, листи між собою скріплюються в чотирьох місцях скобами. Зовнішній діаметр кілець – 1180 мм, внутрішній – 930 мм. Висота кілець: для вузла продувки, розташованого на перевалі подини по осі «поріг робочого вікна – еркерний пристрій» – 170 мм, для трьох інших вузлів – 240 мм. Вогнетривкі стакани виконуються зі спеціальної маси. Потім наноситься верхній шар футеровки еркерної частини на висоту 180-200 мм і укосів з вогнетривкої маси.

«Пряма» система донної продувки передбачає продувку через вогнетривкі фурми.

В корпус подини перед футеровкою печі поміщають три металевих циліндричних шаблони із запірними фланцями для монтажу і демонтажу вогнетривких фурм. Спочатку виконують арматурну футеровку з двох рядів на плашку периклазовою цеглою, залишаючи 3 отвори під фурми, куди вставляють гніздові блоки. Потім нарощують подину вогнетривкою масою і у гніздові блоки вставляють продувні фурми.

Газорозподільна установка для продувних пристроїв обладнана автоматичною системою регулювання тиску і автоматичним байпасом на випадок непередбаченого відключення електроенергії або зниження тиску інертного газу в системі. Ці системи забезпечують постійну подачу газу через фурми при «прямій» продувці або через пористу футеровку подини при «схованій» продувці, а також забезпечують регулювання його подачі в різні періоди плавки в піч. Можливо регулювати витрату газу по фурмам від 10 до 150 л/хв.

Для контролю зношення продувної фурми при «прямій» продувці в кожну фурму вставляється глуходона трубка на 1/3 висоти знизу, в яку постійно подається газ під тиском. При зношенні фурми більш ніж на 2/3 трубка розкривається, змінюється витрата газу та його тиск і подається сигнал на пульт управління про виниклу ситуацію для керування процесом.

Устроями обох типів було обладнано дві ДСП (ДСП-3 – «пряма»; ДСП-2 – «схована») Білоруського металургійного заводу. Показники порівнюються з роботою ДСП-1 не обладнаною продувним пристроєм. Всі три печі мають місткість 100 т, з еркерним випуском металу, обладнані стіновими газокисневими пальниками і трансформатором потужністю 75 МВ⋅А; ДСП-3 додатково обладнана дверним газокисневим пальником, маніпуляторами для вдмухування кисню і вуглецьвмісних матеріалів, установкою для вдмухування доломіту. Основна технологія виплавки сталі – одношлаковий процес з «рідким» стартом з використанням у шихті вуглецевого металобрухту і металізованих окатишів.

Більшу частину в сортаменті ЕСПЦ займає якісна вуглецева легована сталь для металокорду з твердими вимогами по вмісту неметалевих включень і газів. Так, вміст сірки і фосфору в кордовій сталі повинен бути не більше 0,015% кожного, азоту і кисню не більше 50 ррm (0,005%) кожного.

Для обох схем продувки спочатку плавлення витрата газу становить протягом 20 хвилин – 20 нл/хв, потім піднімається до 40 нл/хв і підтримується на цьому рівні протягом 20 хв, а потім до випуску сталі в ківш знову збільшується і підтримується на рівні 60 нл/хв. Витрата продувного газу визначається споживаною потужністю і видом металошихти.

Продувка інертним газом сприяє інтенсивному перемішуванню металу зі шлаком; дрібні пухирці оказують фільтруючий вплив на метал. Шари металу, насичені інертним газом, внаслідок зниження щільності отримують вертикальне переміщення, викликаючи протилежне переміщення сусідніх шарів сталі. В результаті вирівнюється температура і хімічний склад в об'ємі ванни. Перепад температури металу між останнім виміром у печі і першим виміром в ковші знижується на 15оС (табл. 11.11), що дозволяє знизити температуру сталі в печі перед випуском приблизно на 15оС, скоротити тривалість роботи печі під струмом на 1,5-2 хв. і заощадити 15-20 кВт⋅г/т.

**Таблиця 3.13.** Температурний режим плавок з донною продувкою ванни інертним газом

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Плавка | Температура металу, оС | | Δt, оС |
| у печі перед випуском | у ковші |
| З продувкою в печі Ar, N2 | 1712 | 1658 | 54 |
| Без продувки | 1711 | 1642 | 69 |

Позитивний вплив донної продувки ванни на прискорення масообмінних процесів між металом і шлаком пояснюється істотним збільшенням питомої поверхні контактуючих фаз. Причому, сприятливий вплив продувки позначається вже в період плавлення (табл. 3.14). На плавках з донною продувкою вміст фосфору в металі по розплавленню в 1,3-1,5 рази, а сірки в 1,2 рази менше, ніж без продувки. В готовій сталі відповідно в 1,4 і 1,13 рази менше. Варто врахувати, що більш глибока десульфурація і дефосфорація розплаву досягаються при меншій витраті вапна через кращу його асиміляцію шлаковим розплавом. Постійне ефективне перемішування металу і шлаку сприяє більш ранньому утворенню гомогенного високоосновного шлаку; при цьому витрата вапна на плавках з продувкою в порівнянні зі звичайними зменшується на 14-16%.

**Таблиця 3.14.** Десульфурація і дефосфорація сталі при «схованої» і «прямій» продувці в ДСП

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Агрегат, тип продувки | [S]p, % | [S]гт, % | [P]p, % | [P]гт, % | Витрата вапна, кг/т |
| ДСП-1, без продувки (базовий варіант) | 0,023-0,090  0,043 | 0,019-0,049  0,0386 | 0,004-0,038  0,0151 | 0,008-0,037  0,023 | 50,2 |
| ДСП-2 «схована» продувка | 0,020-0,065  0,039 | 0,017-0,048  0,0344 | 0,001-0,038  0,0108 | 0,001-0,035  0,0178 | 42,9 |
| Різниця з базовим варіантом | 0,004 | 0,0042 | 0,0043 | 0,0052 | 7,3 |
| ДСП-3, «пряма» продувка | 0,020-0,050  0,036 | 0,015-0,040  0,0333 | 0,001-0,031  0,0100 | 0,001-0,030  0,0164 | 42,2 |
| Різниця з базовим варіантом | 0,007 | 0,0053 | 0,0051 | 0,0066 | 8,0 |

\**Вміст елементів по розплавленню (р) і в готовій сталі (гт); чисельник – мін-макс; знаменник – середньозважене значення*

Інтенсивне кипіння і додаткове перемішування ванни значно впливає на кінетику процесу зневуглецювання і залишкову концентрацію вуглецю в металі. Додатковий потік газів при продувці ванни аргоном або азотом збільшує масоперенос кисню, створює надшлаковий шар, збагачений нейтральними газами і оксидом вуглецю, і гальмує перехід кисню з пічних газів у метал. В цілому це наближає систему до рівноваги; вміст кисню знижується в середньому на 150 ррm (0,015%) (рис. 11.9). Зменшення концентрації кисню в металі і спливання неметалевих включень при донній продувці в печі сприяють зниженню вмісту оксидних включень у сталі для металокорду в 1,3 і вигару розкислювачів в 1,05 рази. Вихід придатного металу збільшується на 0,5%.

При виплавці якісної сталі, зокрема для металокорду, актуальним є досягнення низького вмісту азоту в металі. Результуюча концентрація азоту в розплаві визначається надходженням його з металошихтою і з атмосфери печі та видаленням, внаслідок кипіння ванни в окислювальний період. При порівняно високому вмісті вуглецю (0,20-0,30%) інтенсивність зневуглецювання металу висока і баланс азоту в металі має негативне значення. Однак, в міру зменшення концентрації вуглецю (до 0,15% і менш) і зниження інтенсивності зневуглецювання баланс азоту стає позитивним за рахунок більш інтенсивного надходження його в метал. Вміст азоту в металі без продувки через днище в цей період збільшується в середньому на 20 ррm (0,0020%). Компенсація потужності кипіння ванни у випадку примусової продувки аргоном знизу забезпечує зниження концентрації азоту в сталі в цей період в середньому на 15 ррm (0,0015%).

Таким чином, застосування системи донної продувки ванни інертним газом дозволяє істотно підвищити якість металу і поліпшити техніко-економічні показники процесу.

**Підвищення якості електросталі.**

Насущними проблемами електроплавки є насичення металу азотом у зоні електричних дуг і підвищений залишковий вміст кольорових металів, внесених металобрухтом.

Звичайно сталь, виплавлена в електродуговій печі, містить до 80-120 ррm (0,008-0,0120%) азоту на відміну від конвертерного металу, де концентрація цього елемента не перевищує 30-40 ррm (0,003-0,004%). Використання пінистих шлаків і до 30-40% первородної шихти дозволяє помітно знизити вміст азоту в сталі на випуску з печі. Перспективним тут може виявитися застосування при позапічній обробці титановмісних шлаків з високою нітридною ємністю і регульованим рівнем окисленості. Використання таких сумішей для рафінування добре розкисленої сталі дозволяє видаляти з рідкого металу до 40% азоту і отримувати в умовах електросталеплавильних комплексів високоякісний листовий прокат із заданим рівнем службових характеристик.

Кольорові метали в сталь вносяться вихідними залізовмісними матеріалами, основним з яких при електроплавці сталі є металобрухт. Вміст суми кольорових металів (Cu+Sn+Cr+Ni+Mo) у металобрухті коливається від 0,35 до 1,2% залежно від марки, що значно перевищує межі кольорових металів у первородних матеріалах (табл. 3.15). Вміст цих елементів практично неможливо знизити в процесі електроплавки, тому вони звуться «залишковими елементами». За ступенем чистоти залежно від вмісту шкідливих домішок кольорових металів вся продукція може бути розділена на три класи. Розподіл сталі по класах за сумарним вмістом шкідливих домішок кольорових металів наведено в табл. 3.16.

**Таблиця 3.15.** Вміст залишкових елементів (Cu+Sn+Cr+Ni+Mo) у різних залізовмісних матеріалах

|  |  |
| --- | --- |
| Шихтовий матеріал | % |
| Залізо прямого відновлення | 0,02 |
| Рідкий чавун / твердий чавун | 0,06 |
| Відходи металообробки + оборотний брухт | 0,35 |
| Свіжий (неокислений) брухт | 0,55 |
| Свіжий пакетований брухт | 0,25 |
| Великоваговий амортизаційний брухт | 0,56 |
| Дроблений очищений брухт | 0,60 |
| Амортизаційний пакетований брухт | 1,20 |

**Таблиця 3.16.** Розподіл конвертерної сталі (А) і електросталі (Б) по класах (I – IIІ) залежно від сумарного вмісту шкідливих домішок кольорових металів

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Клас сталі | А | | Б | |
| 1990 р. | 1997 р. | 1990 р. | 1997 р. |
| I (< 0,1%) | 45,2 | 71,9 | 2,5 | 4,7 |
| II (0,1 – 0,5%) | 41,4 | 25,4 | 46,9 | 25,7 |
| III (> 0,5%) | 13,4 | 2,7 | 50,6 | 69,6 |

Як слідує з наведених даних металургійні підприємства повного циклу, де сталь виплавляють у конвертерах, найбільшою мірою забезпечують виробництво листової сталі для глибокої витяжки з високою міцністю, пластичністю і в'язкістю.

В останні роки посилилися вимоги до основних видів сталевої продукції по «залишковим елементам» (табл. 3.17).

**Таблиця 3.17.** Вимоги по вмісту «залишкових» елементів (%, %).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Готова продукція | Cu | Sn | Σ(Cu+Sn+Cr+Ni+Mo) |
| Гарячекатана, листова | 0,1-0,15 | 0,01 | 0,40 |
| Сорт, дріт | 0,2-0,35 | 0,02 | 0,50 |
| Прутки, катанка | 0,25-0,4 | 0,025 | 0,60 |
| Арматура | 0,3-0,50 | 0,04 | 0,80 |
| Спеціальна легована сталь | 0,08-0,13 | 0,01 | - |

Рішення проблеми можливо шляхом розведення рідкої сталі первородними шихтовими матеріалами, залізом прямого відновлення або чавуном.

Електросталеплавильні комплекси вбудовуються в структуру інтегрованих металургійних заводів і працюють зі значною часткою рідкого чавуну в шихті або шляхом розміщення на одній технологічній лінії з установками по виробництву металізованого заліза. Саме для цієї технології запропоновано печі, обладнані шахтним підігрівником з утримуючими «пальцями», одна з яких була поставлена заводу «Северсталь» і показала можливість економії електроенергії. Металургійні підприємства повного циклу, де сталь виплавляють в конвертерах, забезпечують виробництво листової сталі для глибокої витяжки з високою міцністю, пластичністю і в'язкістю. Використання чавуну (твердого і рідкого) в шихті для дугових сталеплавильних печей дозволяє одержати сталь вищої якості при зниженні витрати електроенергії, електродів і тривалості плавки.

Залежно від долі чавуну в шихті і співвідношення твердої і рідкої складової чавуну змінюються показники процесу. Сучасні технологічні процеси забезпечують максимальну економію електроенергії на кожний відсоток твердого і рідкого чавуну в завалці відповідно 3,4 і 4,8 кВт⋅г. Так, при долі твердого чавуну в шихті електросталеплавильних печей від 20 до 50% економія електроенергії на одному з інтегрованих заводів склала від 72 до 155 кВт⋅г/т при витраті кисню від 20 до 41 м3/т. Однак, при загальному балансі енергетичних і грошових витрат необхідно враховувати витрату альтернативних джерел енергії – кисню, природного газу, коксику. Застосування рідкого чавуну при електроплавці сталі після заміни мартенівських печей на підприємствах з повним металургійним циклом дозволяє зменшити витрату електроенергії на 30-45 кВт⋅г/т на кожні 10% чавуну, що економічно доцільно, особливо при обмежених потужностях трансформатора.

Застосування надпотужних ДСП і акценти на виробництво високоякісної металопродукції загострили проблему якості металошихти. Залежно від якості металошихти зміна продуктивності ДСП може досягати 10%. Причина – нестабільність горіння електричних дуг на початку плавки (перші 12-15 хв.). При оптимальному складі шихтових матеріалів, виходячи зі споживчої вартості, може бути не більше 25% низькоякісного брухту. Твердий чавун, як замінник металобрухту, вигідно відрізняється високою щільністю і низькою температурою плавлення, впливає на електричний режим плавки. При виплавці високовуглецевої сталі в 100- і 200-т дугових печах звичайно застосовують 25-30% твердого чавуну. Досвід показує, що застосування твердого чавуну до 50% не викликає особливих технологічних труднощів при електроплавці. Чиста шихта дозволяє знизити вміст в сталі шкідливих кольорових елементів, а також азоту, сірки і фосфору (при десульфурації і дефосфорації чавуну або при використанні заліза прямого відновлення), що підвищує продуктивність печі і поліпшує якість металопродукції.

При окисленні вуглецю ванни, особливо із застосуванням рідкого чавуну, виділяється велика кількість окису вуглецю, яку варто допалювати до СО2 (тепловий ефект при окисленні [C] до СО2 більш ніж у три рази вище (34012 кДж/кг) у порівнянні з окисленням [C] до СО – (10442 кДж/кг). Результуючий ефект від допалення (з урахуванням ступеню допалення і коефіцієнта передачі тепла металу) становить 35-60%.

**ПОЗАПІЧНА ОБРОБКА ЕЛЕКТРОСТАЛІ**

**Загальна характеристика способів**

Застосування агрегатів позапічної обробки сталі або, як їх ще називають, агрегатів вторинної або ківшевої металургії, дозволяє розділити процеси на пічні і ковшеві, виносячи проведення окремих стадій металургійних процесів у більш дешеві і менш енергоємні в порівнянні з ДСП установки. В цих агрегатах створюються умови для реалізації тих або інших фізико-хімічних процесів. Результатом є підвищення ступеню використання ДСП, а також зниження витрати енергетичних і сировинних ресурсів за рахунок створення більш високого ступеню регулювання окремих технологічних параметрів для управління властивостями сталі. Застосування агрегатів комплексної обробки сталі (АКОС) дозволяє:

* одержувати сталь з необхідними потрібними властивостями, а також з новими властивостями;
* використовувати більш дешеву високовуглецеву сировину;
* заощаджувати непоправні енергетичні і сировинні ресурси.

Використання агрегатів позапічної обробки сталі забезпечує:

1. *Десульфурацію сталі*. Ця операція супроводжується наведенням високоосновного відновлювального шлаку і підігрівом металу до температури порядку 1580оС.
2. *Розкислення сталі.* Ця операція може успішно проводитися в ДСП і в ковші з використанням високоактивних розкислювачів, наприклад, алюмінію. Однак, використання вакуумних агрегатів дозволяє заощаджувати значну кількість дорогого алюмінію і забезпечує до того ж одержання сталі більш чистої по неметалевим включенням.
3. *Зневуглецювання сталі.* У звичайних умовах (дугової сталеплавильної печі) найбільш низький вміст вуглецю в сталі може бути досягнуто на рівні 0,02%, тоді як використання вакуумних установок дозволяє одержувати супернизьковуглецеві сталі з вмістом 0,002% С.
4. *Зниження в сталі вмісту водню* шляхом її вакуумування, що є найбільш економічним способом для флокеночуттєвих сталей у порівнянні з іншими традиційними способами (термічна обробка).
5. *Зниження вмісту азоту*, що найбільш актуально для сталей електропічного сортаменту з попереднім забезпеченням низького вмісту сірки і кисню в сталі.

На рис. 12.1 показано принципову схему основних методів позапічної обробки сталі: процесів, які протікають при атмосферному тиску (I) і процесів, які протікають під вакуумом (II). Всі способи позапічної обробки сталі вакуумом діляться на 4 групи:

1. вакуумування сталі в ковші;
2. вакуумування сталі в струмені;
3. вакуумування порцій металу;
4. вакуумування сталі з підігрівом.

Однак, в четверту групу технологій можуть бути включені способи першої, другої і третьої груп. Тому надалі ми будемо розглядати три варіанти технології вакуумування сталі, маючи на увазі підігрів, як доповнення до перших трьох методів. Слід зазначити, що при організації масового виробництва електросталі в потужній і надпотужній дуговій печах місткістю більше 50 т метод вакуумування сталі в струмені має обмежене застосування. Тому основними промисловими методами вважаються вакуумування в ковші і вакуумування порцій металу.

Позапічна обробка сталі може бути передбачена практично для будь-якої марки сталі і дозволяє одержувати задані технологічні властивості та експлуатаційні характеристики. Нижче наведено рекомендації із застосування способів позапічної обробки для різних груп марок сталей:

* *підшипникові*: вакуумування, десульфурація, обробка синшлаком, корегування складу і температури;
* *нержавіючі*: киснева, аргонокиснева і парогазокиснева продувка, десульфурація, корегування складу і температури;
* *швидкорізальні*: продувка аргоном, корегування складу і температури;
* *електротехнічні*: вакуумування без шлаків, корегування складу і температури, десульфурація, продувка аргоном;
* *мартенівський сортамент*: продувка аргоном, десульфурація, корегування складу і температури.

В цей час більш широко застосовуються і розроблено наступні методи позапічної обробки сталі:

***I група****. З використанням вакууму*.

* 1. циркуляційна дегазація вакуумом з корегуванням складу сталі (RH-Ruhrstahl Heraeus) – високолеговані конструкційні сталі;
  2. циркуляційна дегазація вакуумом з продувкою киснем (RH (OB) – низьковуглецеві високолеговані, низьколеговані, корозійностійкі сталі;
  3. зневуглецювання і дегазація сталі в ковші у вакууматорі з корегуванням складу (VD-Vacuum Decarburization) – низьковуглецеві сталі леговані нітридоутворюючими елементами;
  4. зневуглецювання і дегазація сталі в ковші з корегуванням складу і продувкою киснем (VOD-Vacuum Oxygen Decarburization) – леговані низьковуглецеві сталі.

***II група.*** *Без використання вакууму*.

2.1 обробка сталі в установці агрегат комплексної обробки сталі (АКОС) з дуговим нагрівом і проведенням десульфурації, розкислення, доведення сталі до заданого хімічного складу і температури (LF-Ladle Furnace) – низьколеговані, вуглецеві конструкційні сталі;

2.2 підігрів металу в ковші під ковпаком за рахунок вдування суміші газ-кисень або кисень-тверде паливо з одночасною донною продувкою інертним газом – (CH-Chimie Heating) – низьколеговані, леговані, вуглецеві сталі;

2.3 обробка сталі в ковші твердими шлаковими сумішами з легуванням, розкисленням і продувкою знизу інертним газом (LT-Ladle Treatment) – леговані сталі з особливими вимогами по неметалевим включенням, підшипникові сталі;

2.4 десульфураційна установка (DS-Desulfuration Station) – сталі з особливими вимогами по вмісту сірки;

2.5 продувка інертними газами для усереднення хімскладу і температури – низьколеговані, леговані, вуглецеві сталі для печей Q>50 т.

***III група****. Комбінована позапічна обробка*: піч-ківш+вакуумна обробка.

В табл. 3.18 наведено технологічні можливості агрегатів позапічної обробки сталі. Застосування практично всіх установок забезпечує легування і усереднення хімічного складу сталі. Однак, здійснення кожного з процесів пов'язано з певними умовами. Кожна установка призначена для реалізації окремих металургійних процесів.

**Таблиця 3.18.** Технологічні характеристики агрегатів позапічної обробки сталіх

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Технологічні операції | Тип агрегату | | | | | | | | |
| RH | RH(OB) | VD | OD | F | H | T | S | Detem |
| Видалення водню | х | х | х | х | - | - | - | - | х |
| Видалення азоту | о | х | х | х | - | - | - | - | х |
| Зневуглецювання | х | х | х | х | - | - | - | - | х |
| Глибоке зневуглецювання | - | х | - | х | - | - | - | - | х |
| Розкислення | х | х | х | х | х | х | х | - | х |
| Десульфурація | - | - | х | х | х | х | х | х | х |
| Нагрівання | - | х | - | х | х | х | - | - | х |
| Легування | х | х | х | х | х | х | х | х | х |
| Усереднення складу сталі | х | х | х | х | х | х | х | х | х |

х *– задовільно;* о – *можливо; -* – *неможливо*

Практично у всіх агрегатах утруднений постійний контроль температури. При високій температурі сталі в нас є можливість скорегувати температуру перед розливкою шляхом присадки скрапу, вапна або шлакової суміші. Нагрів же сталі до оптимальної температури розливки можливий в агрегатах (RH(OB), VOD, LF і СН.

Обробка сталі в ковші вимагає підвищеної місткості ковша і вільна зона вгорі ковша коливається від 200 до 1200 мм. Це залежить від типу обробки та приводить до зменшення ваги плавки або використанню нестандартних розливочних ковшів.

**Обробка сталі під вакуумом**

***Теоретичні передумови застосування вакууму***

Вакуумна обробка сталі використовується в електросталеплавильних процесах, головним чином, для виділення газів – водню, азоту і кисню, які оказують в багатьох випадках негативний вплив на механічні властивості і службові характеристики металу.

В основу обґрунтування доцільності застосування вакуумної обробки сталі покладено *закон Сівертса*, який стосовно до двохатомних газів Н2, N2 і О2 називається законом квадратного кореня. Залежність розчинності цих газів у сталі описується узагальненим рівнянням:

.

Для водню, розчиненого в металі по реакції:

1/2Н2 = [H]

концентрація його в металі дорівнює при 1600оС

.

Для азоту: 1/2N2 = [N], при 1600оС: 

Для кисню: 1/2О2 = [О], при 1600оС .

Таким чином, концентрація газів у металі при заданій температурі визначається парціальним тиском газу над металом. Однак, видалити кисень тільки за рахунок зниження тиску, у зв’язку з великим значенням константи рівноваги, практично не представляється можливим. Виділення кисню під вакуумом може відбуватися за рахунок утворення СО по реакції:

[C] + [O] = {CO}, [C]⋅[O] = 0,002PCO при 1600оС.

Виділення розчинених газів з розплаву відбувається за наступними механізмами: а) *безпосередній перехід з розплаву у вакуум на поверхні розділу; б) утворення пузирів на твердій поверхні кладки або присадок (гетерогенне утворення зародків); в) дегазація при підведенні інертного газу в метал*. Виникнення газових пузирів в об'ємі розплаву за рахунок гомогенного утворення зародків практично не можливо через необхідне для цього велике пересичення. В промислових умовах найбільш ймовірно можуть реалізовуватися другий і третій механізми.

Необхідний час встановлення термодинамічно рівноважного вмісту газів у металі визначається швидкістю масообміну між розплавом і атмосферою або вакуумом. Для опису процесу дегазації при вакуумуванні і продувці аргоном при лімітуванні дифузією використовують рівняння масопередачі:

,

де: С и Ср – поточна і рівноважна концентрації, моль/см3; t – час, с;

К – константа швидкості, см/с; А – поверхня, см2; V – об'єм, см3.

Пухирі, які перебувають в металі, стабільні в тому випадку, якщо виконується умова:

Рп ≥ Ра + ρgh + 2σ/r,

де: Рп – тиск газу в пузирі, Па; Ра – атмосферний тиск, Па; ρ – густина, кг/м3; g – прискорення вільного падіння – 981м/с2; h – висота (глибина), м; σ – поверхневий натяг, Дж/м2; r – радіус пузиря, м.

Інтенсивні потоки в металі сприяють дегазації; в турбулентних потоках пузирі дробляться на більш дрібні, так що зростає відношення А/V.

Температурні залежності коефіцієнтів дифузії водню і азоту, (см2/с) виражаються рівняннями:

DH = 3,2⋅ 10-3ехр(-3300/RT),

DN = 2,6⋅ 10-3ехр(-12000/RT).

Для одержання вмісту водню в сталі 0,0001% і менш при вакуумуванні потрібно інтенсивне перемішування за рахунок окислення вуглецю в нерозкисленому металі, або у випадку розкисленого металу, за рахунок продувки аргоном. Варто уникати попадання водню в метал з вологи інертного газу, вогнетривкої кладки і шлакоутворюючих.

Масопередача азоту, в силу більш низьких значень коефіцієнта дифузії, протікає повільніше, ніж масопередача водню. Вона сильно вповільнюється в присутності поверхнево-активних елементів – кисню, сірки, селену. Вони накопичуються на поверхні і лімітують процес дегазації.

Необхідно розрізняти два типи сталей, які піддаються обробці у вакуумі. Обробка попередньо розкисленої сталі і обробка нерозкисленої «киплячої» сталі. При зниженні тиску газу СО над металом відбувається зневуглецювання сталі і її первинне розкислення вуглецем. Це дозволяє скоротити кінцеву витрату більш сильних розкислювачів: кремнію і алюмінію.

***Вакуумування сталі в струмені***

Вакуумування сталі в струмені реалізується при переливі з ковша в ківш, при випуску металу з печі, при розливці сталі. При вакуумуванні сталі в струмені забезпечується швидка і ефективна дегазація, завдяки диспергуванню струменя. Однак, даний спосіб приводить до інтенсивного охолодження сталі і необхідності додаткового її перегріву в печі, що пов'язано з підвищенням витрат і подовженням циклу плавки.

В зв'язку з розширенням сортаменту сталі, яка розливається на МБЛЗ, розроблено варіант захисту струменю металу від вторинного окислення і більш ускладнений варіант додаткового вакуумування струменю металу при переливі її зі сталерозливочного в проміжний ківш. Вакуумування здійснюється в проточній камері невеликого розміру, розташованій між сталерозливочним і проміжним ковшами.

Необхідно відзначити, що вакуумування в струмені найбільш застосовано при виплавці сталей у печах невеликої місткості або при виливку великих злитків масою до 100 т. За рубежем, у США і країнах Західної Європи, цей спосіб застосовується при виплавці корозійностійких сталей, при їх розливці в злитки і при виливку у форму. Найкращі результати досягаються при рафінуванні нерозкисленої сталі, однак можна вакуумувати спокійні і напівспокійні сталі. При вакуумуванні нерозкисленої сталі відношення [C]/[O] повинно бути 1,5-2,5. При цьому вміст кисню знижується до 0,006-0,008%, водню – до 0,0002-0,00025%, азоту до 0,0015-0,002%, кількість неметалевих включень знижується в 2-3 рази, поліпшується якість поверхні і макроструктура литого металу.

Для одного і того ж самого кінцевого вмісту вуглецю на рівні 0,06% вміст розчиненого кисню в нерозкисленій сталі змінюється від 0,02% при РСО = 105 Па до 0,005% при РСО = 104 Па, що дозволяє заощаджувати не менш 0,4 кг алюмінію на тонну сталі. Цей метод є найпоширенішим. Однак, щоб уникнути інтенсивного зневуглецювання сталі необхідно попередньо перед вакуумуванням розкисляти сталь зменшеними добавками кремнію або алюмінію.

***Обробка сталі в стовпі металу (DН)***

Суть цього способу складається в обробці частини металу ковша у вакуумній камері – дегазаторі. Метод DH (Dortmund Hoerder) полягає в періодичному всмоктуванні порції металу у вакуум-камеру і її дегазації. Звільнення об'єму камери від металу відбувається шляхом вертикального переміщення камери або ковша. Спосіб DH, розроблений ще в 1956 році, продовжує застосовуватися в електросталеплавильному виробництві на основі нових модернізованих установок. Модернізація полягає у використанні камер з центральним розміщенням всмоктувального патрубка, поліпшенні системи охолодження донної частини камери, подачі азоту або аргону в патрубок для інтенсифікації перемішування, механізації зміни вакуум-камери. Ці вдосконалення дозволили збільшити швидкість підйому патрубка до 16 м/хв, кількість металу, обробленого за один цикл, зросла з 18 до 25 т, що забезпечило інтенсифікацію процесу дегазації, зменшення вмісту водню на 28-43%, одержання сталі з вмістом 0,0015% С, зниження витрати алюмінію на розкислення сталі.

***Обробка сталі методом циркуляції (RH)***

Метод RH (R – Ruhstahl – фірма-розроблювач і виробник сталі, Н – Heraeus – фірма-розроблювач і виробник вакуумної техніки), розроблений в 1959 році, полягає в постійному вакуумуванні порцій металу шляхом його циркуляції, забезпеченої вдуванням інертного газу в один з патрубків. Необхідні добавки вводяться в метал по ходу вакуумування через спеціальний канал. При цьому забезпечується оптимальне засвоєння елемента без втрат на окислення, тому що процес розкислення і легування протікає у вакуумі. За рахунок природного перемішування металу забезпечується його гомогенізація по температурі і складу. Нижче наведено порівняння розбігу в остаточному аналізі сталі по основним елементам при застосуванні двох методів вакуумування (%, %):

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Метод | C | Si | Mn | Cr | Al |
| RH | ±0,010 | - | ±0,040 | - | ±0,004 |
| DH | ±0,022 | ±0,034 | ±0,052 | ±0,036 | - |

Найбільш перспективним є модернізований процес RH(OB), який забезпечує стабільний хімічний склад сталі, дозволяє здійснювати компенсаційний підігрів, інтенсивно проводити дегазацію і розкислення металу за більш короткий проміжок часу – 12-15 хвилин.

***Метод циркуляційного вакуумування RH(OB)***

Найпоширеніша циркуляційна установка вакуумної дегазації RH в останні роки претерпіла ряд конструктивних змін за рахунок додаткового застосування кисневої фурми, інжектора для вдування порошків і модернізації зовнішньої патрубкової системи RH(OB). Киснева фурма розміщується у верхній частині всмоктувальних патрубків. Кисень також може подаватися у метал, який піддається вакуумуванню, забезпечуючи паралельно з вакуумуванням подачу кисню в обновлений стовп рідкої сталі. Використання кисневої фурми при вакуумуванні дозволяє випускати сталь з ДСП з більш високим вмістом вуглецю і при більш низьких температурах. Компенсація спаду температури при вакуумуванні забезпечується протіканням екзотермічної реакції окислення вуглецю сталі киснем продувки по реакції:

[C] + ½{O2} = {CO}, ΔНо = 110352 КДж/моль.

Швидкість реакції зневуглецювання у вакуум-камері значно вища, ніж у ДСП. Крім того, в останніх розробках застосовано автономну вакуум-камеру, заміна якої вимагає значно меншого часу.

Додатково систему RH(OB) обладнано фурмою для подачі інертного газу в розплав. Сполучення вакууму і продувки інертним газом прискорює процес зневуглецювання і забезпечує інтенсивне перемішування металу, за рахунок повторної циркуляції.

Використання кисневого зневуглецювання в сполученні з підігрівом по методу опору і вакуумування дозволяє одержувати особливо низьковуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 0,002 %. Застосування додаткового підігріву забезпечує залишкову температуру сталі порядку 1570-1580оС, що цілком достатньо для її розливки. Порційнне вакуумування не вимагає великого вільного об'єму ковша. Висота вільного об'єму становить 200 мм. Установки RH(OB) використовують в цей час для виробництва ультра низьковуглецевих сталей, які містять до 0,002% С. Вакуумуванню при цьому піддаються сталі з вихідним вмістом до 0,045% С. Використання кисневої фурми в процесі RH(OB) і добавка на поверхню алюмінієвокремнієвих сплавів дозволяє навіть підвищити температуру металу на 25 градусів за період обробки.

Сучасна технологія плавки в ДСП дозволяє при використанні чистої шихти і роботі на спінених шлаках одержувати метал перед позапічною обробкою з низьким вмістом азоту (до 0,0030%), що з превеликою силою виділяється навіть при вакуумуванні.

Вакуумування дозволяє зменшити концентрацію азоту до 0,0015-0,0020% (на МБЛЗ вміст азоту при розливці із захистом металу знову зростає в середньому на 0,0010%). Активне вакуумвуглецеве розкислення металу знижує концентрацію кисню з 0,0160 до 0,0010%, після навуглецювання вміст кисню зменшується. Видалення водню в середньому з 5 до 2 см3/100 г відбувається, в основному, у період активного розкислення металу вуглецем, небагато збільшуючись після значного навуглецювання. Вакуумування отриманого в ДСП стандартного маловуглецевого напівпродукту з наступним кардинальним (присадки до 6,5-7,0 кг/т) навуглецюванням на установці циркуляційного типу сприяє росту продуктивності комплексу, досягненню підвищеної якості металопродукції, забезпечує вимоги техніки безпеки і екологічних вимог, а також організаційну гнучкість виробничого процесу.

Широкому поширенню вакуумних установок RH(OB) багато в чому сприяло вдосконалення допоміжних систем, які забезпечують технологічний цикл. В цей час занурення патрубків у розплав здійснюється по трьом принципово різним варіантам: 1 – *шляхом вертикального переміщення сталерозливочного ковша спільно зі сталевозом*; 2 – *шляхом вертикального переміщення тільки сталерозливочного*; 3 – *шляхом вертикального переміщення вакуум-камери*. Переміщення ковша зі сталевозом здійснюється за допомогою спеціальної платформи, яка опирається на пуансони гідропідйомників. Механізм гідропідйомників розташовано безпосередньо під вакуум-камерою у підвальному приміщенні. Для реалізації процесу сталевоз з ковшем під'їжджає під вакууматор, стопориться на платформі гідропідйомника, піднімається до занурення патрубків вакууматора на певний рівень, контрольований кінцевими вимикачами, і стопориться на час циклу обробки в такому положенні. Після закінчення циклу обробки сталевоз з ковшем опускається на нульовий рівень площадки, звільняючи патрубки вакууматора, і транспортує сталь на МБЛЗ. Запропонована система значно спрощує вакуумне ущільнення на камері, зменшує висоту відділення. Однак, вимагає застосування високопотужних гідропідйомників і, саме головне, пов'язана з небезпекою попадання металу на гідропідйомники у випадку аварії.

З метою підвищення безпеки системи при аварійних ситуаціях розроблено механізм тросового вертикального переміщення ковша для забезпечення процесу вакуумування. Тросова підвіска для підняття ковша забезпечує більш надійну роботу механізму. Однак, вимагає більш високого відділення, ускладнює і збільшує вагу конструкції розташованої зверху вакуум-камери, тому що необхідно здійснювати підйом ковша з металом, ускладнює роботу інших агрегатів, що забезпечують технологічний процес.

Розроблено також варіант подачі ковша до вакууматора за допомогою поворотного стола. Можливо використання поворотного стола при передачі сталерозливочного ковша від АКОС до вакууматора, що зменшує кількість сталевозних візків і поліпшує схему вантажопотоків.

При безперервній обробці сталі у вакууматорі головною умовою є забезпечення надійної постійної його роботи. З цією метою застосовується система швидкої зміни вакууматора. Розташування вакуум-камери на візку дозволяє змінювати зону обробки сталі по поверхні ковша.

Японська фірма Kawasaki розробила об'ємно-планувальне рішення відділення циркуляційного вакуумування сталі в агрегатах RH(OB). Відділення обладнано двома автономними постами для обробки сталі вакуумом, продувки киснем і інертним газом, установками по легуванню і кінцевому розкисленню сталі. На кожній ділянці передбачається по дві вакуум-камери. Одна робоча, а друга перебуває в ремонті. Вакуум-камери встановлено на візках, які переміщаються, що значно знижує час на їх заміну при ремонті і дозволяє переміщати зону обробки металу по поверхні ковша в період вакуумування. На кожну пару вакуум-камер передбачена одна вакуумзабезпечувальна система із загальною газовідвідною апаратурою. Можливість сполучення вакуумування з одночасним легуванням забезпечується індивідуальною системою бункерів запасу матеріалів для кожної ділянки. Наявність можливості вакуумкисневої обробки в сполученні з активним перемішуванням, легуванням, розкисленням і підігрівом дає можливість конкурувати цьому процесу з процесом постадійної обробки АКОС-вакууматор для певного сортаменту сталей.

***Обробка сталі вакуумом у ковші***

Перший і третій методи представляють собою найбільш широко застосовані варіанти VD-VOD. Другий метод (VAD) набув промислового застосування на заводах Німеччини.

*Метод VAD*. Процес Finkl Heurteу (VAD-Vacuum arс degassing) дозволяє проводити при зниженому тиску дуговий нагрів металу в сполученні з перемішуванням аргоном. Обробка сталі в ковші по цьому методу повинна ділитися на два періоди. Справа в тому, що при зниженому тиску неможливо реалізувати дуговий нагрів, тому що горіння дуги реально здійснюється при тиску не менш 26,6 кПа (200 мм рт.ст.). Тому необхідно розділити фазу обробки вакуумом і фазу нагріву металу.

Створення комплексного агрегату, який поєднує в собі вакуумну дегазацію і комплекс технологічних прийомів, характерних для ковша-печі, є предметом постійного наукового і технічного пошуку.

*Метод DETEM*. Одним з різновидів методів вакуумної обробки сталі в ковші малої місткості від 0,5 до 20 т є процес DETEM, розроблений фірмами Дерренбург Еделштал і Технометал. Назва способу – це комбінація назв цих двох фірм. Спосіб DETEM призначено для вакуумної обробки плавок нержавіючої сталі невеликої ваги без додаткового підігріву. Різновидом варіанта є робота із заглибною фурмою для подачі кисню і з водоохолоджувальною фурмою з соплом Лаваля з подачею кисню на рівні 1 м від дзеркала металу. В обох випадках передбачено продувку металу аргоном при його витраті 20 л/хв. протягом всієї обробки.

Тривалість обробки сталі марки 12Х13 становить, приблизно, 20 хв., а 03Х17Н14МЗ – 30-35 хв., що визначається, в основному, вихідним і кінцевим вмістом вуглецю в сталі. Принципово можливо нагрів металу присадками алюмінію у вигляді дроту. Для десульфурації застосовують порошковий дріт з силікокальцієм. Можливо також доведення сталі по титану, кремнію, алюмінію і вуглецю порошковим дротом. За даною технологією досягається низький залишковий вміст сірки на рівні 0,005% і водню менш 2 ррm (0,0002%). Втрати тепла становлять ~50оС.

*Метод VOD*. Найбільш гнучким агрегатом є VOD. Ківш обладнують трьома донними пористими вставками, через які вдмухують інертний газ у розплав, забезпечуючи інтенсивне перемішування. У поєднанні з продувкою киснем це дозволяє успішно проводити дегазацію, розкислення, зневуглецювання і десульфурацію. При обладнанні додатковими вакуумними шлюзами можна забезпечити легування в процесі вакуумування. Вільний об'єм ковша повинен становити 600-1200 мм. Система VOD дозволяє значно знизити вміст водню до 5-10 ррm при підтримці вакууму на рівні 200 Па (1,5 мм рт.ст.) протягом 15-20 хв. При цьому вміст азоту може бути знижено з 80 ррm до 30 ррm за цей же час при витраті аргону 10 л/т у хвилину. Для більш успішного видалення азоту необхідно мати низький рівень кисню і сірки. Для глибокого зневуглецювання використовується водоохолоджувальна киснева фурма.

***Порівняння циркуляційного і ківшевого вакуумування***

В табл. 3.19 наведено порівняльну характеристику металургійних можливостей установок RH(OB) і VOD. Обидва процеси цілком задовольняють вимогам одержання якісних сталей певного сортаменту.

**Таблиця 3.19.** Показники вакуумування сталі в агрегатах RH(OB) і VOD

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметр | RH(OB) | VOD |
| Висота вільного об'єму ковша, мм | 200 | 600-1200 |
| Стійкість ковша, % | 100 | 60 |
| Шлаковий режим | Низький вплив шлаку | Зниження в металі S і підвищення Si, P, Cr, Mn |
| Залишковий вміст, ррm:   * водню * азоту * вуглецю * сірки | 1-5  40  20  утруднено | 1-5  30  20  10 |
| Час обробки, хв:   * дегазації * зневуглецювання | 15  15 | 20  20 |

У випадку попадання залишкових пічних шлаків у ківш або наведення нових шлаків при VOD може відбутися збільшення вмісту фосфору, кремнію, марганцю і хрому при необхідному ступені десульфурації.

Використання агрегатів RH(OB) дозволяє застосовувати менш ємні сталерозливочні ковші, а також стабільно одержувати ультранизьковуглецеву сталь, яка містить близько 0,002% вуглецю.

**Обробка сталі в установці ківш-піч**

Всі процеси обробки сталі в ковші-печі засновано на підігріві металу електричними дугами, у поєднанні з перемішуванням металу інертним газом. Завдяки наявності синтетичного шлаку, який відповідає обробленій марці сталі, установка ківш-піч забезпечує найбільш повне використання розкислювачів і легуючих. Горіння дуг і окислення графітованих електродів створюють відновлювальну атмосферу і вміст СО на поверхні розплаву досягає 70%. Це забезпечує дуже низький розбіг по вмісту основних елементів від плавки до плавки, який становить (%, %): для С ±0,01; Mn ±0,050; Si ±0,050; Al ±0,010.

Футеровка ковша звичайно виконується з високоякісних вогнетривких матеріалів, щоб забезпечити тривалу обробку добре розкисленої сталі. Особлива увага приділяється зоні футеровки ковша, який перебуває в контакті зі шлаком, так званому «шлаковому поясу». За рубежем для цих цілей використовують цирконієві, корундо-графітові або магнезито-графітові вогнетриви. Корундо-графітові вогнетриви марок “Alucarbon” мають об’ємну масу від 2,85 до 3,15 г/см3, уявну пористість 5-11%, міцність 35-50 Н/мм2 і містять від 5 до 15% С. Магнезито-графітові вогнетриви марок “Maсarbon” містять 90-98% Mg і 2-10% С. Використання таких вогнетривів забезпечує низький залишковий рівень кисню в сталі.

Різновидом процесу ківш-піч є спосіб ASEA-SKF, який за рахунок додаткового електромагнітного перемішування металу забезпечує низький залишковий вміст кисню при меншому часі обробки. При цьому розкид по вмісту основних елементів у серії з 100 плавок наступний (%, %): С ±0,020; Mn ±0,028; Si ±0,05; Al ±0,01. Однак, цей процес вимагає застосування ковшів з немагнітних корозійностійких сталей, які запобігають замиканню магнітних полів. Тому на сучасному етапі найбільше поширення одержали агрегати комплексної обробки сталі (АКОС).

***Установка ківш-піч (LF) – (АКОС)***

Установка ківш-піч або як її називають агрегат комплексної обробки сталі (АКОС) є універсальною, що дозволяє проводити практично всі технологічні операції, передбачені агрегатами СН, LT і DS. Найчастіше АКОС використовується в сполученні з одним з вакуумних агрегатів RH або VD різної варіації. За технологією вищого рівня АКОС є невід'ємною частиною загального технологічного ланцюжка дуплекс-процесу електроплавки сталі ДСП – ківш-піч і служить проміжною ланкою між ДСП і МБЛЗ.

Суть процесу складається у використанні електричного дугового нагріву на завершальній стадії дуплекс-процесу із застосуванням трансформатора з потужністю майже на порядок нижче, ніж у ДСП. В АКОС'і проводиться навуглецювання, десульфурація сталі. Операції по зневуглецюванню і дегазації виконуються у вакуумних агрегатах.

В дійсний час у світі діє більше 700 установок позапічної обробки сталі, включаючи АКОС. В табл. 3.20 наведено параметри АКОС, розроблених різними фірмами і встановлених на різних заводах.

Промислові установки ківш-піч дозволяють досягти максимальної швидкості підігріву від 2 до 6оС/хв, для ковшів місткістю від 15 до 250 т. Інтенсивність підігріву стримується стійкістю ковша в його верхній частині. На практиці питома електрична потужність становить порядку 1,8 МВт/м2. Однак, питома введена потужність знижується зі збільшенням розмірів ковша. Тому швидкість нагріву металу в ковші тим менше, чим більше місткість ковша. Ківш-піч дозволяє точно регулювати температуру сталі перед розливкою з урахуванням її зміни при безперервній розливці сталі.

**Таблиця 3.20.** Параметри установок ківш-піч різних форм

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | АКОС-125 | ММЗ | BSW | MAN-GHH | Fuchs | Fuchs | ASEA-SKF | Krupp |
| Місткість ковша, т | 100-125 | 100 | 86 | 75 | 110 | 165 | 50-130 | 120 |
| Потужність трансформатора, МВ∙ А | 16 | 18 | 12/10 | 12 | 15 | 26 | 12-16 | 18/21 |
| Вторинна напруга, В | 98-280 | 111-320 | - | - | 175-289 | 350(макс) | 156-252 | 100-367 |
| Сила струму, кА | 40,1 | 35 | 25 | - | 30 | - | 36 | 38 |
| Діаметр електрода, мм | 400 | 400 | 350/300 | 350 | 400 | - | 400 | 450 |
| Діаметр розпаду електродів, мм | 650 | 700 | 580/480 | 700 | 700 | - | 825 | 750 |
| Кількість бункерів | 14 | 8 | - | - | - | 12 | 10 | - |
| Швидкість подачі дроту, м/с | 0,7-8,0 | 3-5 | - | - | - | - | - | - |
| Швидкість нагріву, оС/хв | 3-5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4,5 | 4-6 | 4,3 |
| Тривалість обробки, хв. | 25-50 | 45-50 | 20-25 | 70 | 35 | - | 25 | 40-50 |
| Тиск Ar, атм | 3-8 | 3-5 | - | - | 4-8 | - | - | - |
| Витрата електродів, кг/т | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 2,55(разом із ДСП) | 0,34 | - | 0,85 | 0,3 |
| Стійкість футеровки, плавок | 30-60 | 62 | 97 | - | 50-70 | - | 20-30 | 40 |
| Витрата електроенергії,  кВт⋅г/т | 25-40 | - | 20 | 484(разом із ДСП) | 33 | - | 80 | 30 |

АКОС-125 працює дуплекс-процесом з ДСП-125 конструкції ВНДІЕТО.

У складі АКОС передбачено наступні пристрої і системи:

* система дугового електропідігріву сталі зі швидкістю 3-5оС/хв., яка включає систему енергопостачання, трансформатор, траверсу з трьома електродотримачами і алюмінієвими струмопідводами, триангульованою короткою мережею і графітованими електродами;
* система електроустаткування агрегату, яка складається з центрального і виносних пультів управління, в т.ч. автоматизованої системи управління;
* система механізмів укриття ковша, яка включає водоохолоджувальну кришку, механізм підйому кришки;
* механізм переміщення електродів;
* система бункерів і дозувальних пристроїв для подачі сипучих матеріалів у ківш – розкислювачів, легуючих, шлакоутворюючих;
* пристрій для подачі дротових присадок;
* пристрій для вдмухування порошкових матеріалів;
* пристрій для продувки сталі аргоном через пористі вставки;
* система газовідсосу, яка включає евакуацію газу з під кришки і через зонт, встановлений над АКОС;
* контрольні апаратура і пристрої, які забезпечують інформацію про температуру і окисленість металу і шлаку; склад і тиск газу під кришкою; електричні параметри нагріву; тиск і витрату аргону та охолоджувальної води; запас і необхідну витрату матеріалів на заданий процес; положення фурми і датчиків у ковші; тривалість окремих технологічних операцій і циклу позапічної обробки;
* автоматизована система управління багатофункціонального призначення, яка забезпечує збір і обробку інформації перед початком роботи; збір, обробку інформації ходу процесу і оперативне управління процесом по заданій програмі; оповіщення про відхилення від заданих параметрів і порушеннях у роботі механізмів і пристроїв.

Управління ведеться з центрального пульта керування агрегатів шляхом видачі завдання на локальні системи, які забезпечують ведення технологічного процесу (електричний режим, подача кускових і сипучих матеріалів, подача дротових розкислювачів, подача нейтрального газу і вдмухування порошків). Спостереження за різними періодами процесу здійснюється за допомогою телеекрана.

В табл. 3.21 наведено основні характеристики АКОС-125 конструкції ВНДІЕТО, розрахованої на обробку до 1,2 млн. т сталі на рік.

**Таблиця 3.21.** Основні технічні характеристики АКОС-125

|  |  |
| --- | --- |
| Параметри | Значення |
| 1 | 2 |
| 1. Пост електронагріву металу | |
| Маса обробленої сталі, т | 100-125 |
| Потужність трансформатора, МВ⋅А | 16,0 |
| Напруга трансформатора:  первинна, кВ  вторинна, В | 35,0  98-200 |
| Максимальна сила струму джерела живлення, кА | 40,1 |
| Частота струму, Гц | 50 |
| Число фаз | 3 |
| Діаметр графітованого електрода, мм | 400 |
| Діаметр розпаду електродів, мм | 650 |
| Швидкість нагріву металу, оС/хв:  оптимальна  максимальна | 3-3,5  5 |
| Тривалість обробки сталі в ковші, хв. | 25-50 |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 25-40 |
| Витрата електродів, кг/т | 0,3 |
| Стійкість футеровки, плавок | 30-60 |
| *Продовження табл.3.21* | |
| 1 | 2 |
| Механізм переміщення електродів:  хід рухливої частини, мм  максимальна швидкість переміщення рухливої частини нагору, м/хв | 2000±5  6 |
| Механізм підйому кришки:  хід рухливої частини, мм  максимальна швидкість переміщення рухливої частини нагору, мм | 200±5  2 |
| 2. Пристрій для продувки аргоном через пористу пробку | |
| Витрата аргону, м3/год | 6-60 |
| Тиск аргону на позиції обробки, МПа | 0,6-0,8 |
| 3.Пристрій для відбору проб металу | |
| Використовуються стандартні датчики ПМ, ПМР, ТПУ-7483 |  |
| Швидкість переміщення зонду, м/с | 0,2-0,75 |
| Тривалість виміру, хв | 1 |
| Глибина занурення зонда в метал, мм | 400-600 |
| Межі виміру температури, оС | 1500-1800 |
| Хід рухливої частини, мм | 5650±10 |
| Потужність приводу, кВт | 1,5 |
| 4. Пристрій для подачі алюмінієвого і порошкового дроту | |
| Кількість ліній подачі дроту | 2 |
| Діаметр подаваного дроту, мм | 8-12 |
| Діапазон швидкості подачі дроту, м/с | 0,7-0,8 |
| Точність подачі дроту, м | 1,0 |
| Потужність приводів, кВт | 15,0 |
| 5. Пристрій для подачі сипучих матеріалів з системою аерації | |
| Кількість бункерів, шт | 14 |
| Ємкість бункерів, м3 | 6 |
| Продуктивність дозаторів, м3/год | 60 |
| Точність дозування, кг | ±0,5-2 |
| Максимальний розмір шматків | 50 |
| Ширина конвеєрної стрічки, мм | 600 |
| Швидкість транспортування, м/с | 1,0 |
| Потужність приводів, кВт | 7,6 |
| 6. Пристрій для продувки порошкоподібними матеріалами через фурму | |
| Тиск аргону, МПа | 0,8-1,0 |
| Витрата порошкоподібних матеріалів, кг/хв | 30-100 |
| Точність дозування, % | 0,25 |
| Кількість пневмонасосів, шт | 2 |
| *Продовження табл. 3.21* | |
| 1 | 2 |
| Ємкість пневмонасосів, м3 | 1,5 |
| Хід фурми, мм | 5250 |
| Швидкість переміщення фурми, м/хв | 15 |
| 7. Система гідравлічна | |
| Робочий тиск, МПа | 12 |
| Сумарна продуктивність, л/хв | 250 |

Система електроустаткування агрегату містить в собі центральний пульт управління, виносні пульти, шафи і панелі керування з апаратурою управління і КВП. Центральний пульт і шафи розміщаються в єдиному пультовому приміщенні, виносні пульти – безпосередньо у виконавчих механізмів і пристроїв. Агрегат оснащено автоматизованою системою управління із застосуванням мікропроцесорних засобів, які охоплюють основні технологічні операції. Система має можливість здійснювати зв'язок з верхнім рівнем автоматизації (АСУ цеху).

*На трубопрокатному заводі ім. К. Лібкнехта введено* у дію комплекс VD-LF (АКОС), розрахований на обробку 400 тис. т на рік колісної і бандажної сталі, отриманої в мартенівських печах. Комплекс включає установку для скачування шлаків, обладнану спеціальним гребком – маніпулятором, поміщеним в камеру з оглядовим вікном. Після скачування пічного шлаку і наведення покривного шлаку ківш з металом за допомогою самохідного електровізка передається до установки АКОС, накривається кришкою-склепінням із захисним екраном. Установку обладнано трансформатором потужністю 12 МВА, електродотримачами з трьома електродами, до яких підводиться струм силою 31,4 кА і напругою 150-320 В з регулюванням по 12 ступеням. В днищі ковша є пористі вставки, через які подається аргон під тиском 3 атм. Витрата аргону на продувку 25-500 л/хв. АКОС обладнано також фурмою для продувки зверху, дозувальними пристроями для подачі розкислювачів і легуючих. Швидкість нагріву металу в ковші близько 3 оС/хв, тривалість обробки 25-35 хв. Після обробки сталі в ковші-печі ківш з металом передається в камеру вакуумування VD. Вакуумну установку обладнано 4-х східчастим вакуумним пароструминним ежекторним насосом, який забезпечує залишковий тиск до 200 Па (~1,5 мм рт. ст.). Передбачено також продувку металу аргоном через пористі вставки в днищі ковша під тиском 3 атм з витратою 50-500 л/хв. Сталь обробляється протягом 20-25 хв, що дозволяє одержувати залишковий вміст водню на рівні 2 ррm (0,0002 %) і кисню на рівні 100 ррm (0,01%). Обробці піддається до 10 марок флокеночуттєвих сталей, що дозволяє уникнути більш дорогого і трудомісткого процесу противофлокенної термічної обробки.

*Установка ківш-піч спеціальної конструкції.* В цьому випадку, якщо немає ковшевоза і можливості використання кранових ресурсів по різним виробничим причинам обмежено, досить позитивно зарекомендувала себе установка ківш-піч з поворотним столом, розрахована на прийом як мінімум двох ковшів. Відразу після установки на поворотний стіл ківш повертається в позицію нагріву на стенді (при піднятій кришці ковша з електродами) і починається процес обробки.

Наступний ківш встановлюється на друге прийомне місце стола і «очікує» закінчення обробки сталі в першому ковші.

В цій позиції можна почати гомогенізацію сталі шляхом продувки інертним газом. Після обробки першого ковша стіл повертається і ковші, таким чином, міняють позиції. Для забезпечення проміжної зміни ковшів досить тільки одного розливочного крана. На установці ківш-піч з індивідуальним поворотним стендом і двома приймальнями місцями ківш з металом може подаватися в різні позиції. Тим самим, можливий вибір спеціальної позиції ковша для введення в розплав порошкового дроту без порушення інших технологічних операцій.

Як додатковий варіант є концепція здвоєної установки ківш-піч.

***Технологічні особливості обробки сталі в ковші-печі***

При організації обробки сталі в ковші-печі (АКОС) необхідно, насамперед, визначити необхідну температуру сталі на випуску з печі і час необхідний для обробки сталі з урахуванням подальшої схеми виробництва.

*Температуру сталі на випуску* можна визначити з балансового рівняння:

tвип = tр + Δtв + Δtп + Δtпр - Δtпід, оС

де: tр = tл +(35+40) – температура розливки;

tл = 1537 – {88[C] + 8[Si] + 5[Mn] +4[Ni] + 5[Cu] + 17[Ti] + 1,8[Cr] + 1,3[V] + 2[Mo] + 25[S] +30[P]} – температура ліквідус сталі;

Δtв – втрати температури на випуску;

Δtп – втрати температури при переливі в проміжний ківш;

Δtпр – втрати температури при позапічному рафінуванні сталі;

Δtпід – підвищення температури при підігріві металу в печі-ковші.

Незалежно від технології подальшого рафінування з використанням однотипної печі з еркерным випуском металу Δtв і Δtп будуть однаковими. Основна увага повинна бути приділена втратам температури при позапічному рафінуванні Δtпр. В цей час існує два напрямки технології позапічного рафінування. Перший – присадка основної кількості шлакоутворюючих і феросплавів під струмінь металу на випуску з подальшою десульфурацією і доведенням у ковші-печі. Другий – присадка цих же матеріалів у піч-ківш порціями з одночасним підігрівом і наступним доведенням сталі. Присадка шлакоутворюючих і феросплавів у ківш на випуску пов'язана з надмірним охолодженням металу (табл.3.22) і приводить до утворення гетерогенних малоактивних шлаків, що спричиняє збільшення часу для їх остаточного формування.

**Таблиця 3.22.** Охолоджувальний ефект від присадки найбільш споживаних матеріалів у ківш на випуску при позапічній обробці металу (розраховуючи на 1% присаджувального матеріалу)

|  |  |
| --- | --- |
| Матеріал | Зменшення температури, оС |
| Навуглецювач | 50-80 |
| ТШС (вапно + пл. шпат) | 24 |
| Ферохром | 20 |
| Феромарганець | 16 |
| Феросиліцій | 0 |

Практика показує, що для компенсації охолодження металу на випуску, як правило, додають у ківш алюміній з розрахунку 1,5-2 кг на тонну рідкої сталі, що забезпечує додаткове виділення тепла за рахунок окислення алюмінію оксидами заліза шлаку порядку 920 кДж на 1 кг алюмінію. При присадці близько 10 кг твердих шлакових сумішей (ТШС) на 1 т рідкої сталі на їх розплавлення потрібно 1250 кДж тепла, що компенсується введенням 1,5-2,5 кг алюмінію за рахунок виділення 1380-2300 кДж тепла. Однак, витрати виробництва, пов'язані з додатковою витратою алюмінію, занадто великі.

При обробці сталі марки Ст20 початковий спад температури становить порядку 60оС при подачі розкислювачів і ТШС у ківш під струмінь. При донному випуску сталі з ДСП місткістю 80 т з температурою порядку 1615 оС, яка містить (%, %): С – 0,08, Si – сліди; Mn – 0,20; P – 0,030; S – 0,030 подається за перші 2 хвилини ТШС у складі (кг): вапно – 500; плавиковий шпат – 125; феросиліцій – 185; високовуглецевий феромарганець – 185; алюміній – 10; мелений кокс – 20 при витраті аргону 1500 нм3. За три хвилини спад температури становить 60оС і до початку нагріву в ковші-печі знижується до 1555оС, знижуючись ще на 5оС за час транспортування ковша до АКОС. Укриття шлаками в ковші попереджає насичення металу азотом, воднем, вторинне його окислення киснем повітря. Однак, при цьому рафінувальний шлак практично не працює, оскільки він не встигає розплавитися і значна його частина не має необхідних фізичних властивостей, тому що шлак гетерогенний. При включенні напруги трансформатора ковша-печі з активною потужністю 5,5 МВА продовж 8 хвилин температура перебуває на одному рівні і потім відбувається нагрів металу зі швидкістю 3 оС/хв до температури 1595оС. Після присадки розкислювальної суміші і нагріву сталь має наступний хімічний склад (%, %): С = 0,10; Si = 0,20; Mn = 0,40; P = 0,035; S = 0,025. При виході на максимальну температуру 1595оС здійснюють легування сталі шляхом добавки в ківш-піч (кг): феросиліцій – 110; феромарганець середньовуглецевий – 110; вапно – 100 при одночасній продувці аргоном із загальною витратою 700 нм3. Температура металу знижується до 1550оС і в плині 6 хвилин продовжують нагрів при потужності трансформатора 2,8 МВА. По закінченні легована сталь має хімічний склад (%, %): С = 0,14; Si = 0,28; Mn = 0,50; P = 0,035; S = 0,020. Процес підігріву, десульфурації і легування триває в плині 40 хв. Потім метал передається на розливку. За час транспортування і переливу металу в проміжний ківш температура металу знижується на 25оС и становить 1555оС при температурі ліквідус 1518оС. Розливка триває в плині 48 хвилин. За цей час температура металу знижується до 1541оС и перегрів над температурою ліквідус становить 23оС. Найбільш доцільним вважається введення основної кількості ТШС і легуючих у ківш-піч з паралельним дуговим підігрівом металу.

*Час, необхідний для підігріву сталі в ковші* з обліком тепловитрат і теплових втрат можна розрахувати виходячи з енергетичного або теплового балансу з урахуванням можливої втрати температури:

τ = Q/NА, год.

де: Q = Q1 + Q2 + Q3 + Q4 + Q5 – загальні витрати енергії, які включають:

Q1 – на нагрів і плавку ТШС;

Q2 – на компенсаційний нагрів сталі в ковші;

Q3 – на нагрів і плавлення легуючих;

Q4 – на компенсацію втрат з охолоджувальною водою;

Q5 – на компенсацію втрат, які акумулюються футеровкою ковша.

Для 100-тонної печі при витраті 2% ТШС і 2% легуючих загальні витрати енергії Q = 6000 кВт;

NА = Ny⋅ηел – активна потужність трансформатора ковша-печі, де: Ny – встановлена потужність трансформатора (МВ⋅А); ηел – електричний к.к.д.; приймаючи для 100-тонної ДСП ківш-піч з трансформатором Ny = 20 МВ⋅А и ηел = 0,85 одержимо

NА = 20000⋅0,85 = 17000 кВт.

Тоді необхідний час для підігріву металу в ковші-печі складе:

τ = Q/NА = 6000/17000 = 0,35 години ≈ 21 хв.

Для прискорення розчинення легуючих добавок рекомендується їх давати порціями після підвищення температури сталі до 1580оС. При цьому АКОС повинно бути обладнано системами, які дозволяють робити постійну добавку твердих присадок. Регламент позапічної обробки сталі в АКОС з порціонною подачею ТШС і легуючих з паралельним підігрівом, розроблений інститутом «Стальпроект», забезпечує компенсаційний підігрів сталі в ковші-печі продовж 18 хвилин при повному циклі позапічної обробки порядку 37 хвилин. Крім того, пропонується весь процес позапічної обробки розділити на дві стадії і проводити на двох стендах.

Цей варіант може бути рекомендовано в тому випадку, якщо загальна тривалість циклу позапічного рафінування (від кінця випуску до початку розливки) перевищує тривалість циклу плавки з необхідністю забезпечення на МБЛЗ розливки «плавка на плавку» як можна більш тривалою серією. Цей варіант вимагає додаткових капітальних вкладень. Однак може бути виправдано при необхідності підвищення ступеня використання ДСП і збільшення виробництва сталі.

Для вдосконалення технології позапічної обробки сталі в АКОС передбачається проводити продувку металу десульфуруючими сумішами через дві фурми. Високий ступінь десульфурації забезпечується розкисленням сталі алюмінієм, який вводиться в ківш-піч у вигляді дроту за допомогою трайб-апаратів. Модифікування тугоплавких включень глинозему Al2O3 здійснюється силікокальцієм, який вводиться у вигляді порошкового дроту. Для забезпечення раціонального режиму і управління морфологією неметалевих включень необхідно дотримуватись швидкості (V) і температури введення порошкового дроту (tпр) залежно від температури ліквідус (tл) сталі (табл. 3.23).

**Таблиця 3.23.** Швидкість введення силікокальцієвого порошкового дроту діаметром 12,8 мм в сталь різних марок

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка сталі | Вміст основних елементів, % | | | | | | tл, оC | tпр, оC | V, м/с |
| С | Mn | Si | Cr | S | P |
| Ст50 | 0,50 | 0,65 | 0,27 | - | 0,03 | 0,025 | 1500 | 1580 | 1 |
| Ст10 | 0,09 | 0,50 | 0,28 | - | 0,03 | 0,025 | 1535 | 1620 | 6 |
| Ст3сп | 0,18 | 0,52 | 0,20 | - | 0,03 | 0,025 | 1526 | 1610 | 4 |
| 40Х | 0,42 | 0,65 | 0,27 | 0,95 | 0,01 | 0,020 | 1510 | 1590 | 0,5 |
| 09Г2 | 0,10 | 1,60 | 0,27 | - | 0,01 | 0,020 | 1540 | 1620 | 6 |

Для стабілізації хімічного складу і службових характеристик сталей 40Х, 09Г2 при температурі перед розливкою (tпр) 1590-1620оС можливий також варіант легування кремністими, марганцевими і хромистими феросплавами за допомогою порошкового дроту. АКОС дозволяє забезпечити легування і розкислення сталі з різною температурою ліквідус (tл) шляхом використання мікроприсадок, у вигляді порошку, щільнозапресованого в сталеву трубчасту оболонку. Такий дріт подають в метал, який перебуває в ковші, в заданій кількості з певною швидкістю, інтенсифікуючи засвоєння присадок перемішуванням металу газом.

Застосування цього способу при доведенні сталі в ковші-печі створює наступні переваги: точність мікролегування; високу ступінь засвоєння добавок і відтворюваність результатів; малі втрати; практичну відсутність поглинання азоту і кисню при введенні добавок; можливість управління складом і морфологією неметалевих включень; екологічність процесу; підвищення якості металу; економічність і простота автоматизації; низькі капітальні витрати.

***Вибір потужності трансформатора установки АКОС-ківш-піч***

Перехід до технології вищого рівня визначає необхідність перенесення основних технологічних прийомів відновлювального періоду в АКОС. При цьому одне з головних завдань є ефективна десульфурація і доведення сталі до заданого хімічного складу і температури, які вимагають додаткового підігріву металу. Швидкість і ефективність нагріву металу і розплавлення добавок, поряд з іншими факторами, визначається також потужністю трансформатора АКОС. Різноманіття факторів, які визначають вибір потужності трансформатора, обумовлює великий розкид даних на графіку залежності потужності від місткості АКОС. При цьому необхідно враховувати, що в ряді випадків для АКОС використовують трансформатори модернізованих або ліквідованих ДСП.

При нагріві сталі в АКОС виділяється дві стадії. Спочатку відбувається вирівняння температури металу, поверхневих шарів футеровки ковша, склепіння і електродів з одночасним розплавленням шлакоутворюючих і металевих добавок. При цьому температура металу трохи стабілізується. Потім на другій стадії йде властиво нагрів сталі до заданої температури.

Активна потужність трансформатора, необхідна для нагріву металу і добавок визначається по формулі:

 МВт,

де: ηд – тепловий к.к.д. дуги; Нмд – питома витрата енергії на нагрів сталі і добавок на 1оС у діапазоні 1550-1650оС, кВт⋅г/(т⋅оС); Ммд – маса металу і добавок, т; можна прийняти, що маса добавок становить, приблизно, 10% від маси рідкої сталі і тоді Ммд = 1,1 Мж; Vt – швидкість нагріву металу, оС/хв. Експериментальні значення Нмд наведено в табл.3.24.

**Таблиця 3.24.** Питома витрата енергії (Нмд) для АКОС різної місткості (Gт) і потужності трансформатора (Р)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Місткість АКОС (G), Т | Потужність трансформатора (Р), МВА | Питома витрата енергії (Нмд), кВт⋅г/(т⋅оС) |
| 25 | 4,5 | 0,62 |
| 45 | 8,0 | 0,40-0,50 |
| 120 | 18,0 | 0,35-0,40 |
| 180 | 25,0 | 0,30-0,35 |

Зі збільшенням місткості АКОС і потужності трансформатора знижується питома витрата енергії, що пов'язано зі зменшенням питомих теплових втрат. Для ковшів місткістю більше 180 т використовується наступне емпіричне вираження для потужності теплових втрат:

,

де: Р и М - потужність теплових втрат і маса металу для 180 т ковша; Ртп і Мм – теж для ковша місткістю більше 180 т.

Згідно розрахунковим даним ηд для ковшів місткістю 200, 250, 300 і 350 т становить 0,639; 0,656; 0,670 і 0,681 відповідно. Швидкість нагріву металу коливається від 2 до 6оС/хв. Використовуючи ці дані можна з певним ступенем допустимості визначити шляхом екстраполяції вихідну потужність (Р) для АКОС необхідної місткості. З урахуванням практики коефіцієнт потужності трансформатора АКОС (cosϕ) перебуває в межах 0,62-0,75, що дає нам можливість визначити встановлену потужність трансформатора Ру (МВ⋅А). Однак, для ефективного використання потужності трансформатора велике значення має обґрунтований вибір живильного струму і напруги. Силу струму можна визначити з рівняння:

I2 = m⋅P0,72,

де: I2 – сила струму на електроді; m – коефіцієнт, який характеризує енергообмінні особливості процесу і для умов АКОС значення m = 5,72.

Вторинна робоча напруга визначається з виразу:



при U2тр.в. = 1, 2-1,25U2Р – для вищого ступеня і U2тр.н. = 0,85U2р – для нижчого ступеня. Кількість ступенів трансформатора для АКОС місткістю 12-350 т з трансформатором – 4-50 МВ⋅А відповідно становить 6-12, збільшуючись з підвищенням потужності трансформатора.

В табл. 3.25 наведено рекомендовані параметри трансформатора для АКОС (ківш-піч) місткістю 12-350 т.

Напруга дуги (Uд) визначається по формулі:

,

де: ηел – електричний к.к.д.

Зв'язок напруги дуги і її довжини (lд) описується емпіричним виразом:

Uд = *а* +*в*lд,

де: *а* – сума анодного і катодного спадання напруги, В;

*в* – спадання напруги в стовпі дуги, В/мм.

**Таблиця 3.25.** Рекомендовані параметри трансформатора для агрегатів ківш-піч 12-350 т

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Місткість агрегату, т | Номінальна потужність трансформатора, МВ⋅А | Сила струму електрода, кА | Діапазон вторинних напруг, В |
| 12 | 4,0 | 12,7 | 227-127 |
| 20 | 6,0 | 14,9 | 290-137 |
| 30 | 8,0 | 19,3 | 299-150 |
| 50 | 12,8 | 26,6 | 326-167 |
| 70 | 16,0 | 32,5 | 355-181 |
| 90 | 20,0 | 36,8 | 392-190 |
| 130 | 25,0 | 43,3 | 417-203 |
| 180 | 30,0 | 48,4 | 447-212 |
| 230 | 36,0 | 57,5 | 452-227 |
| 280 | 42,0 | 62,8 | 483-232 |
| 350 | 50,0 | 72,2 | 500-251 |

За даними С.Й.Хитрика і Чуйко М.М. для дугових печей *а* = 9-30 В (для пари вугілля-сталь – 22 В; вугілля-основні шлаки – 9 В; вугілля-кислі шлаки – 30 В); *в* = 3,5-4 В/мм у період окислення і *в* = 1, 0-1,2 В/мм у відновний період.

Довжина дуги збільшується з ростом місткості АКОС і швидкості нагріву, що необхідно враховувати при визначенні висоти шлаків у ковші, для забезпечення екранування дуг. У стадії нагріву і розплавлення шлакової суміші збільшення висоти шлакового шару з 30 до 200 мм забезпечує підвищення швидкості нагріву з 2 до 3,4оС/хв. Для ефективного екранування дуг необхідно забезпечити товщину шлакового шару на рівні (2,5-3,0)lд.

Таким чином, при розробці технології вищого рівня необхідно забезпечити надійну роботу АКОС за рахунок обґрунтованого вибору потужності трансформатора і електричних параметрів установки.

**Установки хімічного нагріву металу в ковші СН (CHF)**

Існує кілька різновидів установок хімічного підігріву металу в ковші. Підігрів може здійснюватися за рахунок вдування газо-кисневої або вуглецево-кисневої сумішей під ковпак, який опускається під рівень шлаку у ковші, з одночасною продувкою металу в ковші інертним газом через пористі вставки в днищі ковша. При цьому швидкість нагріву невисока і низька ступінь використання енергоресурсів. Другий варіант (CHF) передбачає додатковий підігрів металу за рахунок тепла окислення Al і Si, що вводиться одночасно з подачею кисню. Окислення відбувається у вогнетривкій трубі, яка вводиться в метал, і швидкість нагріву може досягати до 10 оС/хв. Однак, при цьому утворяться оксиди Al2O3 і SiО2, для зв'язування і нейтралізації яких необхідно додатково вводити вапно або порошковий дріт з кальцієвим наповнювачем. Тому необхідно звертати увагу на можливе додаткове забруднення сталі неметалевими включеннями.

Порівняльні дані, які характеризують роботу установок АКОС і CHF показують (табл. 3.26), що хімічний нагрів може здійснюватися зі швидкостями, приблизно, в два рази вище, ніж електронагрів. Однак, на цьому переваги установок CHF вичерпуються.

Необхідно відзначити, що застосування різних видів підігріву металу в ковші визначається, насамперед, наявністю виду енергоресурсів і їх вартістю. Безумовно, хімічний підігрів може виявитися вигідним при необхідності проведення всіх відновно-рафінувальних процесів у ДСП (десульфурація, легування, розкислення) і при вакуумній обробці сталі.

**Таблиця 3.26.** Порівняльні характеристики установок АКОС і CHF

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметри | Показники | |
| АКОС | CHF |
| Швидкість нагріву, оС/хв | 3-5 | 7-10 |
| Витрата: електроенергії, кВт⋅г/т⋅оС  кисню, нм3/т⋅оС  алюмінію, кг/т⋅оС  графітованих електродів, кг/кВт⋅г  вогнетривкої цегли, кг/т | 0,4  -  -  0,01  - | -  0,03  0,04  0,15 |
| Наявність кисневої фурми | так | так |

Однак, установка АКОС дозволяє, як ми з вами в цьому переконалися раніше, не тільки підігріти метал, але винести більшість операцій відновного періоду класичної електроплавки з ДСП, підвищуючи при цьому ступінь використання максимальної потужності трансформатора ДСП і збільшуючи продуктивність комплексу в цілому. Тому чисто економічне порівняння двох методів підігріву металу в ковші не дає можливості заключити про доцільність застосування того або іншого методу. Все повинно визначатися виробничими умовами. При відповідних вихідних капіталовкладеннях застосування установок типу АКОС набагато перспективніше, більш прогресивніше і економніше.

Існує також спосіб нагріву рідкого металу в сталерозливочному або промковші з використанням електродів, які витрачаються, аналогічно методу ЕШП. На дзеркало металу в агрегаті наводять рідкорухливий шлак, який має температуру ліквідус у межах від 1250 до 1500оС и питомий електроопір в рідкому стані від 0,3 до 2,0 Ом⋅см. Для здійснення процесу придатні всі можливі способи підводу потужності змінного або постійного струму.

**Інші види позапічної обробки сталі в ковші**

Позапічна металургія сталі найбільш застосована і необхідна для подальшого розвитку і удосконалення технології виплавки спеціальних сталей у ДСП. Ця технологія дозволяє найбільш повно здійснити дефосфорацію, розкислення, десульфурацію сталі, а також регулювати кінцевий склад і температуру сталі, що приведе до поліпшення і стабілізації фізичних і службових характеристик металу.

Як показано раніше, у позапічній металургії використовуються різні ковші, ківш-піч, міксери, які працюють у бажаній атмосфері, під інертним газом або у вакуумі, забезпечуючи внесення необхідних добавок і збільшуючи коефіцієнти використання елементів, запобігаючи переходу шкідливих домішок у сталь.

Організація виробництва сталі в ДСП за принципом дуплекс процесу ДСП-АКОС, коли в ДСП реалізуються металургійні процеси окислювального періоду, а всі рафінувальні процеси відновлювального періоду здійснюються поза піччю, вимагає вживання заходів для запобігання рефосфорації металу, тобто зворотного переходу фосфору зі шлаку у метал при легуванні і рафінуванні сталі, які можна реалізувати різними методами.

***Запобігання попадання шлаків у ківш***

Цей процес пов'язано, в першу чергу, із запобіганням попадання окислювальних шлаків у ківш при спільному випуску металу і шлаку або при недостатнім обмеженні попадання шлаків у сталерозливочний ківш при використанні навіть печей з донним або сифонним випуском сталі. Кількість пічного шлаку, який попадає у ківш при еркерному випуску сталі з ДСП невизначено і порівняно з кількістю ТШС, використовуваних для наведення десульфуруючого шлаку (1-2% від маси плавки) при позапічній обробці в АКОС. Ця обставина затрудняє або унеможливлює відтворену (повторювану за результатами) рафінувальну обробку сталі в АКОС до низького вмісту сірки і неметалевих включень у межах технологічного часу, що забезпечує задану високу продуктивність виробничого комплексу. В зв'язку з цим з'являється необхідність при виробництві низькосірчаного металу обов'язкового видалення пічного шлаку з ковша перед позапічною обробкою металу.

Для видалення фосфору необхідно мати високий кисневий потенціал, за рахунок присутності окислювального шлаку, який містить 12-20% FeО, високу основність шлаку (СаО/SiО2 ≤1,8), розвинену реакційну поверхню між рідкою сталлю і шлаком і можливо низьку температуру процесу. При позапічному рафінуванні сталі, коли необхідно провести глибоку десульфурацію, вимоги до умов процесу десульфурації практично протилежні. Для десульфурації необхідно мати шлаки основністю 2,2-2,4, низький кисневий потенціал, забезпечуваний вмістом FeО у шлаку ≤1,5%, високу температуру. Ці умови значною мірою сприяють рефосфорації, тобто зворотному переходу фосфору в метал. Тому питання видалення пічних шлаків окислювального періоду з ковша є актуальними, особливо для печей з жолобним випуском сталі. При випуску сталі разом зі шлаками в ковші може відбутися відновлення оксидів фосфору елементами розкислювачами. В середньому вміст Р2О5 у конвертерних шлаках, які виплавляють сталь з використанням звичайних передільних чавунів становить 2,5% і із застосуванням високофосфористих чавунів вміст Р2О5 у конвертерних шлаках може досягати 10%. Тому кожні 90 кг звичайних конвертерних шлаків можуть привести до рефосфорації 0,001% Р. Ці дані свідчать про негативний вплив окислювального шлаку у ковші на якість сталі. Тому необхідно або випускати метал без шлаку або видаляти шлак з ковша, щоб зменшити масообмін між металом і шлаком при обробці сталі в ковші. В деяких випадках перед розкисленням металу необхідно проводити додаткову дефосфорацію сталі. Питання рефосфорації злободенні також при виплавці сталі в ДСП одношлаковим процесом.

Запобігання і зменшення контакту металу і шлаку та видалення шлаку може здійснюватися різними способами. На сучасних ДСП, обладнаних сифонним або донним випуском сталі, можна практично повністю запобігти попаданню окислювального шлаку у ківш при роботі ДСП із залишком рідкого металу в печі до 10%. Цей прийом називають робота печі на «болоті рідкого металу». Однак, в більшості випадків в електросталеплавильному виробництві і, особливо, у ливарних цехах випуск сталі в ківш ведеться зі шлаками через жолоб. Тому необхідно розглянути заходи щодо зменшення або запобігання потрапляння шлаків у сталерозливочний ківш. Запобігти потраплянню шлаку у ківш можна декількома способами. *Перший спосіб* полягає в припиненні випуску сталі при виході перших порцій шлаку. Цей спосіб є простим, однак технологічно небажаний, тому що приводить до заростання випускного отвору і виходу частини шлаків у пічний приямок, що викликає необхідність додаткового обслуговування печі. *Другий спосіб* полягає в переливі сталі з одного ковша в іншій з відсіченням шлаків. Цей спосіб можна застосовувати як для конвертерної плавки, так і при плавці сталі в ДСП. Однак, при цьому відбувається зниження температури металу для 100-тонного попередньо розігрітого ковша на 25-40оС, що вимагає перегріву металу в печі.

*Оригінальний спосіб* запропоновано японськими інженерами. Короб циліндричної фурми, футерований зсередини і зовні, підвішується до підтримуючої підвіски. На початку випуск сталі проводиться безпосередньо в ківш, а потім наприкінці випуску зверху на ківш встановлюється підвіска і струмінь сталі попадає в короб. В коробі є отвір, який закритий вогнетривкою пробкою кулястої форми. В міру наповнення короба пробка спливає, забезпечуючи сполучення сталі в ковші і коробі, шлак залишається в коробі. Після закінчення розливки короб краном піднімається, сталь з короба витікає в ківш через отвір. При виході сталі знижується рівень шлаку і опускається пробка, яка перекриває отвір у коробі, запобігаючи потраплянню шлаку у ківш.

Найпоширенішим варіантом, який забезпечує мінімальний час контакту зі шлаком, є *скачування шлаку з ковша після випуску сталі*. Цей спосіб застосовується практично завжди перед позапічною обробкою сталі вакуумом або рафінуванні і легуванні сталі в ковші. Скачування шлаку проводиться на спеціальному стенді механічним способом за допомогою гребків. Протягом 5 хв видаляється до 90% шлаку. При цьому температура металу знижується на 20оС и ступінь рефосфорації не перевищує 15%. Так при переливі 90 т конструкційної сталі вміст фосфору змінився з 0,012 до 0,014%. При цьому способі висота сталерозливочного ковша повинна бути збільшена на 1 м.

Як відзначалося раніше, питання видалення окислювального шлаку і, природно, рефосфорації повинно враховуватися, особливо, при позапічному розкисленні сталі. Ступінь рефосфорації можна знизити шляхом обмеження часу і площі контакту метал-шлак. Це можна здійснити *шляхом загущення шлаків* або шляхом *введення розкислювачів* і легуючих безпосередньо в сталь без контакту зі шлаком.

Під час випуску подають під струмінь металу дефосфоруючу суміш, склад якої може бути наступним: вапно – 2,7-6 кг/т, залізна руда – 2,7-4 кг/т, плавиковий шпат – 0-0,3 кг/т. Для поліпшення перемішування по стінках ковша в середній його частині розташовують кілька дерев'яних брусів, згоряння яких сприяє прискоренню процесу дефосфорації при подачі шлакової суміші під струмінь. Обробка конструкційної сталі вагою 75 т у ковші дозволила знизити вміст фосфору з 0,015 до 0,012-0,008%. Кращі результати отримано при використанні суміші, яка складається з всіх трьох компонентів з інтенсифікацією процесу за рахунок горіння дерев'яних брусів. Через 2-3 хвилини можна приступати до операції розкислення і легування.

***Усереднення температури і складу сталі в ковші***

Перемішування сталі є необхідною операцією для всіх позапічних процесів обробки сталі в ковші. Це забезпечує гомогенізацію сталі по температурі і хімічному складу після всіх видів обробки, поліпшенню якості сталі по неметалевим включенням після розкислення, за рахунок кращого спливання оксидів, кремнію і алюмінію, які утворюються. Найбільш повно інтенсифікує процес перемішування вдування інертного газу через шар сталі, що сприяє дробленню пузирів газу і збільшує об'єм перемішування. При цьому дуже швидко відбувається гомогенізація сталі по температурі і складу. При продувці сталі азотом з витратою 200 л/хв у ковші місткістю 100 т достатнім є час 10-15 хв. для гомогенізації сталі і видалення неметалевих включень.

В цей час у більшості випадків регулювання температури сталі перед розливкою здійснюється шляхом введення охолоджувачів (брухт, окатиші), сполучаючи цей процес з перемішуванням для збільшення швидкості розчинення охолоджувачів. Для зниження температури металу на 5оС у ківш місткістю 250 т досить ввести 2 кг брухту на тонну рідкої сталі при відповідній продувці до 50 л/хв інертного газу. Без продувки введення 1 кг брухту на тонну сталі знижує температуру на 1,7оС. Можна регулювати температуру шляхом тільки однієї продувки.

Однак, при організації технології електроплавки вищого рівня, при виносі рафінувальних процесів з печі, у більшості випадків необхідно робити нагрів сталі по ходу технологічних операцій і наприкінці циклу рафінування-легування.

***Розкислення – регулювання складу сталі***

Ефективність розкислення сталі визначається, головним чином, стабілізацією коефіцієнта засвоєння розкислювачів. Нестабільність процесу відбувається через різний ступінь взаємодії металу з футеровкою, шлаками і атмосферою. Методи введення добавок, які дозволяють обмежити неконтрольоване окислення і стабілізувати коефіцієнт засвоєння розкислювачів і легуючих можна об'єднати в три групи:

* *введення добавок безпосередньо в метал під звичайною атмосферою;*
* *введення під нейтральною атмосферою;*
* *введення під вакуумом;* (процес вакуумного рафінування розглянутий нами раніше).

Введення добавок безпосередньо в метал під звичайною атмосферою здійснюється шляхом вдування порошку, шляхом введення порошкового дроту або шляхом пневматичного введення за принципом пневмоудару. Шляхом вдування порошків в сталь можна ввести найрізноманітніші добавки. На невелику глибину (0,2-0,4 м) звичайно вдувають карбюризатори в кількості до 10 кг/т або порошки легуючих у кількості до 1 кг/т, які мають високу пружність пари. Введення високолетучих елементів, таких як кальцій або магній, повинно здійснюватися на більшу глибину. Існуючі установки дозволяють вдувати порошки карбюризаторів, розкислювачів і легуючих розміром зерна 0,4-2 мм зі швидкістю до 100 кг/хв при витраті газу 800-1500 л/хв і співвідношенні газ/порошок 15-30 л/кг. Для управління морфологією включень у сталь, розкислену алюмінієм, вводять силікат кальцію в кількості 1,5 кг/т або порошок вапна до 0,5 кг/т. При цьому отримують дисперсні глобулярні включення алюмінатів кальцію і дисперсні включення CaS – сульфідів кальцію, недеформовані при прокатці. Можливо також регулювати морфологію неметалевих включень шляхом вдування порошків силікату кальцію на невелику глибину.

***Способи введення добавок у ківш***

*Введення добавок за допомогою трайб-апарату.* При розкисленні сталі алюмінієм, через велике розходження в об’ємній масі алюмінію і сталі, введення кускового алюмінію на дзеркало металу приводить до дуже низького корисного використання алюмінію. Метод введення алюмінію на штанзі в ківш дає гарні результати, однак обмежений малою кількістю. Існує метод одноразового введення 40-100 кг алюмінію з використанням гідравлічного циліндра. При цьому засвоєння алюмінію становить близько 60%. Випробувано також введення високоактивних добавок у трубчастому контейнері. Цей спосіб було використано при обробці сталі рідкоземельними елементами церієвої групи з метою глобуляризації сульфідних включень. Однак, ці методи не одержали широкого промислового поширення.

Найбільше поширення, особливо для ковшів великої місткості, одержав спосіб введення алюмінію в ківш з великою швидкістю у вигляді дроту або прутка за допомогою трайб-апарату (рис. 12.43). В цей час практично всі АКОС обладнано цими пристроями. Наприклад, одна з установок дозволяє подавати пруток діаметром 12 мм зі швидкістю 4 м/с при витраті алюмінію 73 кг/хв і максимальній його подачі 150 кг. Із застосуванням цього методу корисне використання алюмінію досягає 80%, а найбільш бажаний вміст його в сталі на рівні 0,03-0,05% досягається в 70% випадків. В той же час, при звичайному способі введення алюмінію чушками стабільність його вмісту забезпечується тільки лише в 50% випадків. Цей спосіб використовується також при введенні чистого кальцію або сплавів Si-Ca, Ca-Al у вигляді порошкового дроту. Під час введення металевий кальцій, перш ніж розплавитися, випаровується, поліпшуючи тим самим ступінь корисного використання. Для сталі, яка розкисляється алюмінієм, можна вводити порошковий дріт, який містить кальцій і алюміній. При цьому витрата кальцію становить 0,5 кг/т і час введення дроту близько 10 хв при швидкості введення 10 м/с. Однак, потрібно відзначити, що якщо алюмінієвий дріт або пруток є, так сказати, звичайною продукцією, то порошковий дріт потрібно готовити спеціально, що приводить до додаткових витрат.

Великі маси металу 150-300 т обробляють алюмінієм за допомогою спеціальних гармат, які дозволяють вводити безпосередньо в метал злитки алюмінію вагою 0,45-0,8 кг. При цьому розкид у вмісті алюмінію становить 0,006%, в той час як при звичайному методі введення алюмінію чушками різниця у вмісті алюмінію в сталі становить 0,0175%. Використання спеціальних гармат дозволяє заощаджувати до 80% алюмінію. Цей спосіб можна так само використовувати при введенні кальцію, бору, церію, але при цьому необхідно, насамперед, вирішити питання про їх підготовку у вигляді спеціальної упаковки.

При введенні добавок у звичайний сталерозливочний ківш використовуються також різні способи, засновані на використанні заглибного пристрою різних варіацій.

*Процес CAS* дозволяє розкисляти і легувати сталь при одночасному перемішуванні і захисті металу аргоном. Сполучення відсічення шлаку, захисту дзеркала металу і перемішування дозволяє досягти високого ступеня корисного використання різних добавок. Порівняння результатів процесу CAS і звичайної обробки сталі наведено нижче:

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Варіант технології | Корисне використання елементів, % | | | | |
| С | Si | Mn | Al | Ti |
| Звичайна технологія | 50-80 | 100 | 50-90 | 50-60 | 50-80 |
| Технологія CAS | 100 | 100 | 100 | 80-90 | 100 |

При процесі САS вміст кисню знижується до 40 ррm, проти 50-100 ррm, забезпечуваних простою продувкою аргоном.

*Процес SAB* (Sealed argon bubbling) (рис. 12.45) реалізується під синтетичним шлаком, що наводиться на поверхні металу, який перебуває під зануреним вогнетривким порожнім циліндром. Сполучення продувки сталі аргоном із захистом металу синтетичним шлаком дозволяє значно підвищити використання легуючих елементів і стабілізувати хімічний склад сталі.

*Процес САВ* (Capped argon bubbling). Ківш зверху закрито кришкою з отвором для введення добавок і взяття проб. Синтетичний шлак покриває всю поверхню металу в ковші. Перевагою цього процесу є зменшення окислення елементів сталі повітрям, зниження теплових втрат завдяки наявності кришки і зменшення поглинання сталлю азоту повітря.

**ДУГОВІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІ ПЕЧІ**

**ЗМІННОГО СТРУМУ (ДСП)**

**Загальна характеристика ДСП**

В новій концепції розвитку сталеплавильного виробництва змінюються як технологічна схема електроплавки, так і дугова сталеплавильна піч. Передбачається виплавка в ДСП стандартного залізовуглецевого напівпродукту з окисленням, в основному, вуглецю і фосфору при роботі печі з максимальною потужністю трансформатора на довгих дугах (високій напрузі). В цих умовах введення електричної потужності з високою напругою можливо тільки при оперативно спінених шлаках, що наводяться. Для проведення окисних процесів і оперативного наведення таких шлаків надпотужні дугові печі оснащують системами для введення вуглецю в метал і шлак.

Робота на високій напрузі (близько 1000 В) є змушеною мірою, тому що щільність струму на електродах обмежена – 25-30 А/см2, а оптимальний діаметр електродів в ДСП змінного струму (широко освоєний у світовій і вітчизняній практиці) становить 610 мм з припустимими навантаженнями до 80-90 кА. В зв'язку з цим виникає обмеження рівня максимальної одиничної встановленої потужності трансформаторів, що в цей час становить 125-150 МВ⋅А. Подальше підвищення потужності вимагає створення і освоєння роботи електродів діаметром 700 мм при максимально можливому зменшенні діаметра розпаду електродів. Максимальна місткість створених в Російській Федерації сучасних надпотужних високопродуктивних ДСП становить 140 т (по масі металу, який випускається, в ківш) і трансформатором 125 МВ⋅А, що відповідає сучасному рівню питомої електричної потужності (900-1000 кВ⋅А/т).

Джерелом електропостачання ДСП є підстанції з напругою на високій стороні 35 і 110 кВ. Потужність трансформатора кожної ДСП місткістю 140 т становить 125 МВ⋅А, а разом з трансформатором для установки ківш-піч (КП) збільшується до 145-150 МВ⋅А, у випадку двох пар комплексів ДСП-КП – до 300 МВ⋅А. Визначальними факторами при виборі типу і місткості дугових електропечей є їх продуктивність і сортамент сталей, які виплавляються. Нижче наведено рекомендації з місткості печей, застосованих для різних груп сталей (т):

|  |  |
| --- | --- |
| - Вуглецеві, конструкційні, низьколеговані | - 100-200; |
| - Підшипникові, конструкційні, високоякісні | - 50-100; |
| - Корозійностійкі | - 25-100; |
| - Швидкорізальні | - 12-25; |
| - Прецизійні сплави | - 6-12. |

За останні роки в провідних металургійних країнах різко покращилися виробничі показники виплавки сталі (табл. 3.27).

Технічні характеристики печей країн СНД наведено в табл. 3.28, а основні параметри ДСП фірми Даніелі представлено в табл. 3.29.

**Таблиця 3.27.** Динаміка зміни виробничих показників для високопродуктивних ДСП Японії

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Показники | Р о к и | | | | | |
| 1970 | 1975 | 1980 | 1985 | 1995 | 2000 |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 630 | 567 | 537 | 480 | 400 | 378 |
| Тривалість плавки, хв | 180 | 148 | 118 | 85 | 70 | 65 |
| Витрата електродів, кг/т | 6,0 | 5,0 | 4,0 | 3,2 | 2,6 | 2,3 |

**Таблиця 3.28.** Основні технічні дані дугових сталеплавильних печей країн СНД

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Технічні дані | Т и п п е ч і | | | | | | | | |
| ДСП-0,5 | ДСП-1,5 | ДСП-3 | ДСП-6 | ДСП-12 | ДСП-25 | ДСП-50 | ДСП-100 | ДСП-200 |
| Номінальна місткість, т | 0,5 | 1,5 | 3 | 6 | 12 | 25 | 50 | 100 | 200 |
| Діаметр кожуха на рівні укосів, мм | 1720 | 2400 | 2950 | 3350 | 4260 | 4700 | 5800 | 6900 | 8400 |
| Потужність трансформатора, кВ⋅А | 630 | 1250 | 2000 | 5000 | 9000 | 15000 | 32000 | 75000 | 125000 |
| Діапазон вторинної напруги, В | 216-98 | 225-103 | 243-116 | 281-118 | 320-120 | 390-132 | 500-170 | 761-250 | 950-300 |
| Максимальний вторинний струм, кА | 1,68 | 3,21 | 4,8 | 9,85 | 17,3 | 23,55 | 50 | 69,4 | 87 |
| Діаметр електрода, мм | 150 | 150 | 200 | 300 | 350 | 400 | 500 | 610 | 610 |
| Діаметр розпаду електродів, мм:  на рівні склепіння  на рівні порога |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 480 | 520 | 700 | 900 | 1000 | 1250 | 1450 | 1700 | 1700 |
| 480 | 520 | 700 | 900 | 1000 | 1250 | 1250 | 1350 | 1600 |
| Діаметр ванни на рівні укосів, мм | 1100 | 1500 | 1800 | 2230 | 2740 | 3540 | 4560 | 5900 | 7330 |
| Глибина ванни від порога, мм | 260 | 360 | 400 | 425 | 565 | 775 | 995 | 1100 | 1480 |
| Висота від порога до п'ят склепіння, мм | 645 | 900 | 1050 | 1100 | 1365 | 1500 | 1905 | 2070 | 2720 |
| Маса металоконструкцій, т | 5,2 | 11,3 | 22,80 | 50 | 90 | 168 | 360 | 510 | 850 |
| Розрахункова питома витрата електроенергії на розплавлення твердої завалки, кВт⋅г/т | 650 | 535 | 515 | 500 | 470 | 360 | 440 | 420 | 420 |

**Таблиця 3.29.** Основні об'ємно-планувальні параметри ДСП фірми Даніелі

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Основні параметри | Розмірність | Місткість ДСП, т | | | | | |
| 50 | 80 | 100 | 120 | 150 | 180 |
| Зовнішній діаметр кожуха ДСП | м | 4,9 | 5,5 | 6,1 | 6,5 | 7,0 | 7,5 |
| Макс. висота підйому крюка крана, (А) | м | 18,600 | 19,650 | 21,500 | 21,500 | 22,500 | 23,700 |
| Макс. висота підйому електродів, (В) | м | 18,300 | 19,350 | 21,100 | 21,100 | 22,100 | 23,300 |
| Висота робочої площадки, (С) | м | 6,200 | 6800 | 7,000 | 7,000 | 7,300 | 7,300 |
| Відстань між центром печі і трансформаторним приміщенням, (D) | м | 9,300 | 10,450 | 11,300 | 11,750 | 12,200 | 12,800 |
| Відстань між центром печі і механізмом підйому склепіння (Е) | м | 4,200 | 4,700 | 5,200 | 5,200 | 5,500 | 5,800 |
| Довжина робочої площадки, (L) | м | 5,500 | 6,500 | 7,500 | 7,500 | 7,900 | 8,400 |
| Ширина робочої площадки, (F) |  | 9,500 | 10,700 | 11,700 | 11,700 | 12,700 | 13,700 |
| Охолоджувана поверхня ДСП | м2 | 28 | 35 | 45 | 49,5 | 57,5 | 61 |

Техніко-економічні показники роботи електродугових печей провідних країн наведено в табл. 3.30. За нормами Укрдіпромеза продуктивність печей різної місткості наведено в табл.3.31.

**Таблиця 3.30.** Техніко-економічні показники роботи кращих дугових печей світу

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Країна | Місткість  печі по  масі  металу, що випускається, т | Потужність трансфор-матора, МВ⋅А | Рекордна  продуктивність | | Наведена продук-  тивність, т/МВА⋅г | Фактичні видаткові  показники | | |
| т/г | тис. т  місяць | електро-енергія,  кВт⋅г/т | електроди, кг/т | кисень,  м3/т |
| Японія | 120  120  155 | 75  58  55 | 90  96  126 | 54  60  77 | 1,5  1,9  2,5 | 378  389  383 | 2,9  2,3  2,6 | 37  33  32 |
| ФРН | 60  107  145 | 48  75  110 | 60  92  128 | 33  62  нема від. | 1,7  1,6  1,9 | 390  523  440 | 2,7  2,5  3,3 | 22  23  н.в. |
| ПАР | 75  157 | 60  96 | 58  107 | 28  55 | 1,2  1,5 | 470  500\* | 2,5  3,5 | 14  25 |

**\****З використанням металізованої сировини*

**Таблиця 3.31.** Продуктивність дугових сталеплавильних електропечей (т. рідкої сталі) за нормами технологічного проектування

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номінальна місткість печі, т | Потужність трансформатора, кВ⋅А | Тривалість плавки, год.-хв. | | | Продуктивність печі, т/рік | | |
| електропічний сортамент | електропічний сортамент з позапічною обробкою | мартенівський сортамент | електропічний сортамент | електропічний сортамент з позапічною обробкою | мартенівський сортамент |
| 6 | 4800 | 2-45 | 2-35 | - | 18000 | 19000 | - |
| 12 | 9600 | 2-45 | 2-35 | - | 36000 | 38000 | - |
| 25 | 15000 | 3-10 | 3-00 | - | 64000 | 67000 | - |
| 50 | 38000 | 3-10 | 3-00 | 2-15 | 125000 | 130000 | 175000 |
| 100 | 60000 | 3-20 | 3-10 | 2-15 | 230000 | 245000 | 300000 |
| 150 | 90000 | 3-30 | 3-20 | 2-30 | 360000 | 375000 | 425000 |
| 200 | 125000 | 3-40 | 3-30 | 2-45 | 410000 | 430000 | 550000 |

**Сучасний комплекс дугової сталеплавильної печі ДСП-125**

Російським інститутом ВНДІЕТО розроблено конструкцію сучасної електросталеплавильної печі місткістю 125 т типу ДСП-125 з встановленою потужністю трансформатора 95/110 МВ⋅А, що є модернізованим варіантом ДСП-100.

Дугова сталеплавильна електропіч ДСП-125 призначена для виплавки сталі різного сортаменту в технологічній лінії з АКОС і повинна використовуватися для одержання рідкого напівпродукту зі сталевого брухту, металізованих окатишів, переробного чавуну.

Електропіч (табл. 3.32) відноситься до категорії дугових сталеплавильних печей надвисокої потужності і обладнана стіновими водоохолоджуваними елементами і водоохолоджуваним склепінням спеціальної конструкції, що забезпечує доопалювання оксиду вуглецю в робочому об'ємі печі, оснащена комплектом газокисневих пальників, розташованих у стінах, дверцятах робочого вікна і у зоні еркерного випуску металу, комплектом сопел «гострого» дуття для доопалу СО і Н2 в печі, маніпулятором для вдування в розплав вуглецю, окису кальцію і кисню з метою перемішування розплаву і утворення спінених шлаків, маніпулятором для взяття проб металу і виміру температури по ходу плавки, має систему автоматизованого управління на базі мікропроцесорної техніки.

Передбачено пост позапічного підігріву шихти в бадді пічними газами. Система газоочистки електропечі складається з реакторів для очищення газів, які відходять, від пилу, шкідливих і токсичних складових – диоксинів, фуранів, оксидів азоту, що забезпечує екологічну чистоту процесу електроплавки сталі. За вимогами замовника електропіч може бути оснащено системою донної продувки ванни киснем і інертним газом. Передбачено пости для підігріву сталерозливних ковшів до 1200оС.

Основною несучою конструкцією печі є двохсекторна люлька, на якій збираються складові частини електропечі. Сектора колиски при нахилі печі перекочуються по двох паралельних фундаментних балках. Зрушенню люльки при нахилі запобігають шипи, розташовані на секторах, які входять в отвори, виконані у фундаментних балках. Нахил печі для зливу металу і скачування шлаку забезпечується двома гідроциліндрами, закріпленими одним кінцем до секторів люльки, а іншим – до фундаменту через кульові шарніри.

Кожух печі – звареної конструкції, має роз'їм на рівні порога, що дозволяє швидко замінити його верхню або нижню частину для ремонту. Верхня частина кожуха виконана циліндричною, подовженої форми, основу якої становить трубчастий каркас з двома горизонтальними поясами і вертикальними стійками. З внутрішньої сторони до верхньої частини по всьому периметру за допомогою клинового з’єднання кріпляться водоохолоджувані панелі. Виконання кожуха подовженим по вертикалі дозволяє використовувати енергію тепла технологічних газів, що утворюються при розплавленні, для нагріву шихти. В міру нагріву, плавлення і осідання шихти верхня частина об'єму печі звільняється і служить для доопалювання СО і Н2 за допомогою кисню, який подається через сопла «гострого» дуття. Це забезпечує виділення додаткового тепла в робочому об'ємі печі, а не в системі газоочистки. Нижню частину кожуха виконано циліндро-сферичної форми з еркером і з горизонтальним поясом жорсткості. Водоохолоджувані стінові панелі кожуха з внутрішньої сторони покриваються спеціальною обмазкою. Перемішування розплаву у ванні забезпечується за допомогою інертного газу, який подається через пористі вогнетривкі пробки, розташовані в днищі печі.

**Таблиця 3.32.** Основні технічні характеристики печі ДСП-125

|  |  |
| --- | --- |
| Параметр | Значення |
| Місткість електропечі, т: номінальна  максимальна | 125  140 |
| Діаметр кожуха на рівні укосів, мм | 7200 |
| Встановлена потужність пічного трансформатора, МВ⋅А | 95 або 125 |
| Номінальна первинна напруга, кВ | 35 або 110 |
| Діапазон вторинної напруги, В,  В тому числі з постійною потужністю | 951-324 або 1050-615  1050-900 |
| Максимальна сила струму, кА | 67 або 77 |
| Число фаз | 3 |
| Частота струму, Гц | 50 |
| Діаметр графітованого електрода, мм | 610 |
| Діаметр розпаду електродів, мм | 1200 |
| Хід електродів, мм | 4000 |
| Витрата охолоджуваної води, м3/год:  хімічно очищена  технологічна | 50  650 |
| Максимальна потужність паливного пальника, МВт | 6,0 |
| Тривалість розплавлення під струмом, хв. | 40-50 |
| Питома витрата:  електроенергії, кВт⋅г/т  електродів, кг/т  природного газу, нм3/т  кисню, нм3/т  вугільного пилу, кг/т | 300-350  2,5-3  8-10  35-40  10-12 |

Конструкція склепіння електропечі, герметично встановленого на кожусі, - комбінована: футерована купольна центральна частина і водоохолоджувана периферійна частина, сформована з окремих трубчастих секцій. Купольна частина склепіння має три отвори для введення електродів, навколо яких розміщено газодинамічні ущільнення. У водоохолоджуваній частині склепіння виконано отвори для патрубка газовідводу і для подачі сипучих.

Комплект газокисневих пальників включає чотири пальники, встановлені в кожусі по периметру печі в найменш теплонавантажених зонах, один пальник, який вводиться в робоче вікно, і один пальник, розміщений в зоні еркерного випуску. Потужність пальників змінюється (до 6 МВт) залежно від режиму плавлення. В комплект сопел «гострого» дуття входять три-чотири сопла, розташовані в кожусі печі, ближче до підсклепінного простору. Маніпулятор для введення кисню і пиловугільної суміші розташовано на робочій площадці поруч з піччю і вводиться в піч через отвір у кожусі.

Електропіч оснащена струмопровідними рукавами електродотримачів. Можливо оснащення печі системою спреєрного охолодження електродів. Затиск електрода в голівці електродотримача і його звільнення проводиться пружинно-гідравлічним механізмом, що складається з набору пружин, гідравлічного циліндра, тяг і притискного хомута. Затиск здійснюється під впливом зусилля пружин, а звільнення електрода – подачею під тиском рідини в циліндр. В гірлянді з водоохолоджуваних кабелів великого перетину на кожну фазу печі приходиться по чотири штуки. Коротку мережу печі виконано за схемою «трикутник» на виводах трансформатора.

Механізм підйому і повороту склепіння, призначений для відкривання електропечі при завантаженні шихти, має вигляд вертикального вала, що переміщається в опорах корпуса за допомогою гідроплунжера. Для завантаження шихти зверху передбачено кошик грейферного типу.

В конструкцію печі входять системи масловідводу, водоохолодження, повітропроводу, паропроводу. Гідроприводи механізмів електропечі живляться від насосно-акумуляторної станції, що забезпечує сумарну продуктивність насосів 2500 л/хв з робочим тиском 0,61 і 1,23 МПа. Управління механізмами проводиться за допомогою електрогідравлічних золотників на гідравлічній панелі. Для забезпечення безпечної і надійної експлуатації електропечі в схемі керування передбачено електричне блокування. Управління переміщенням електродів в процесі плавки автоматично за допомогою електрогідравлічного регулятора потужності. Керування роботою печі по ходу плавки здійснюється автоматизованою системою управління (АСУ) на базі мікропроцесорної техніки. АСУ забезпечує рішення наступних функціональних задач: збір, первинна обробка і зберігання поточної інформації про стан і роботу електропечі; програмно-логічне управління і оптимізація енерготехнологічних режимів електроплавки, включаючи електричний режим, режим роботи пальників, фурм для продувки розплаву, сопел «гострого» дуття зі зворотним зв'язком по ряду контрольованих параметрів, зміною ступеня напруги і параметра регулювання, який задається, автоматичного регулятора, зміною потужності пальників, співвідношення палива і окислювача; підтримка заданих енергетичних режимів електроплавки, реєстрація параметрів по ходу плавки, печать паспорта плавки.

**Удосконалення дугових сталеплавильних печей**

Основними напрямками підвищення ефективності електроплавки сталі і застосування дугових сталеплавильних печей при реконструкції діючого виробництва та при проектуванні нових ділянок і цехів є:

* збільшення питомої потужності трансформатора і удосконалення електричного режиму плавки;
* удосконалення конструкції електропечі;
* інтенсифікація введення кисню і застосування альтернативних джерел енергії;
* попередній підігрів брухту;
* розробка і застосування дугових печей постійного струму.

***Збільшення питомої потужності трансформатора і удосконалення електричного режиму плавки***

Збільшення питомої потужності трансформатора звичайно стримується низькою конструктивною і технологічною стійкістю окремих вузлів печі (стіни, склепіння), більшими втратами в короткій мережі, виконанням у печі операцій, що не вимагають максимальної потужності.

Впровадження технології вищого рівня забезпечує технологічні, конструктивні і організаційні рішення, при яких середня електрична потужність підтримується на рівні не нижче 90% максимальної. Цей показник є одним з визначальних при розробці концепції високопродуктивної печі. За останні двадцять років питома потужність печей зросла з 200-400 до 500-900 кВ⋅А/т і на окремих печах досягла 1000 кВ⋅А/т. Однак, у зв'язку з використанням в останні роки в дугових печах альтернативних енергоносіїв (паливно-кисневі пальники, підігрів шихти і т.п.), рекомендується підтримувати трохи меншу питому потужність.

Збільшення одиничної потужності трансформатора стало можливим завдяки серйозним конструктивним змінам ДСП, удосконаленню системи електропостачання і струмопідводу, застосуванню альтернативних джерел енергії, виносом окремих металургійних операцій у менш енергоємні агрегати типу ківш-піч. Наведена на зміна тривалості плавки за останні 40 років зі збільшенням питомої потужності трансформатора включає також вплив інших факторів, що обумовили можливість використання цієї потужності. Зменшення тривалості процесу плавки прямо пов'язано зі зміною технології плавки і конструкції плавильного агрегату.

Перехід на широке *використання кисню* для інтенсифікації плавлення наприкінці 60-х початку 70-х років привело до зниження тривалості плавки до 2,5 годин і підвищенню питомої потужності трансформатора до 500 кВ⋅А/т, завдяки більш ранній стабілізації горіння дуг через більш швидке накопичення металевого розплаву. Використання кисню і винос операцій по остаточному доведенню металу в *позапічні агрегати* сприяло зниженню тривалості процесу плавки до 2-х годин з одночасним підвищенням питомої потужності трансформатора до 600 кВ⋅А/т. Істотну роль у підвищенні питомої потужності трансформатора зіграла розробка і впровадження концепції технології вищого рівня, реалізованої за принципом *дуплекс-процесу: ДСП-АКОС*. Застосування печей з водоохолоджуваними елементами стін і склепіння, одержання в ДСП стандартного напівпродукту, незалежно від кінцевого сортаменту сталі, використання ДСП лише для реалізації задач окислювального періоду плавки, з виносом операцій по десульфурації і доведенню сталі в АКОС, використання паливно-кисневих пальників, автоматизація процесу завантаження феросплавів і АСУТП дозволили вийти на питому потужність 700 кВ⋅А/т і знизити тривалість плавки у два рази, довівши її до 1,5 г.

Бурхливий розвиток в останнє десятиліття різних варіантів попереднього підігріву шихти, широке *використання кисню і альтернативних джерел енергії*, у сполученні з роботою ДСП на *довгих дугах і спінених шлаках* дозволило в широкому масштабі до 1995 р. перейти на питому потужність до 800 кВ⋅А/т і забезпечило тривалість процесу плавки в електропечі протягом 65-75 хвилин (IV). І, нарешті, застосування всіх раніше накопичених досягнень у сполученні з широким *використанням продувних фурм, інжекційних пристроїв, паливно-кисневих пальників, надзвукових кисневих копій*, удосконалення конструкції склепіння, стін печі, електродотримачів, підвищення якості електродів, удосконалення системи утилізації тепла газів, що відходять, способу випуску сталі з печі дозволило до кінця 2000 року вийти на питому потужність порядку 900 кВ⋅А/т при тривалості процесу в ДСП на рівні 55-60 хвилин. Впровадження останніх досягнень в електрометалургії сталі в *поєднанні з високою організацією праці* дозволило на окремих печах і заводах Західної Європи і Японії досягти тривалості плавки в ДСП на ріні 38-45 хвилин. Необхідно розуміти, що само по собі лише підвищення питомої потужності трансформатора без застосування печі відповідної конструкції і використання всіх досягнень технології вищого рівня не може забезпечити необхідного результату. Тільки впровадження цих удосконалень дає нам можливість підвищити питому потужність трансформатора, а це, в свою чергу, у поєднанні з іншими заходами, дозволить знизити тривалість процесу і підвищити продуктивність.

Технологія вищого рівня дозволяє істотно підвищити використання потужності трансформатора в порівнянні з двохшлаковою і навіть одношлаковою технологіями, при цьому тривалість циклу плавки скорочується приблизно в 2-4 рази. Використання трансформатора в піковому режимі в період розплавлення шихти вимагає забезпечення мінімальних втрат на вторинній стороні і захисту первинної сторони від різких і частих кидків струму. Важливим фактором є *скорочення довжини гнучких кабелів*, що на практиці реалізується при використанні печей з донним випуском. Удосконалення способу розташування шинних пакетів, зменшення їх загального опору, застосування трансформатора з пофазним регулюванням потужності і перемиканням ступенів під навантаженням, використання струмопідводящих електродотримачів, введення додаткової індуктивності (дроселя) дозволяють зменшити електричні втрати. Так у ДСП діаметром 7,3 м, місткістю 146 т з трансформатором потужністю 96 МВА, вторинні обмотки з'єднано за схемою «зірка», кожна обмотка має свій перемикач ступенів напруги, що дозволяє регулювати напругу кожної з дуг незалежно. Допускається різниця до чотирьох ступенів, за рахунок чого можна міняти розподіл потужності по фазах. Всього ступенів 18, напруга міняється від 511 до 912 В. Діаметр електродів 660 мм, довжина 2794 мм. Піч обладнано пристроєм автоматичного переміщення електродів. В основному режимі регулятор підтримує заданий вторинний струм, збільшуючи напругу без опускання електродів. В автоматичному режимі регулятор безупинно вимірює вторинну напругу і струм, генеруючи сигнали, які надходять у котушку серво-клапана, регулює тиск в системі гідравлічного переміщення електродів, викликаючи тим самим підйом або опускання електродів. В системі електроживлення печі встановлено фільтр-компенсувальну установку (для зменшення впливу працюючої печі на інших споживачів) компенсації реактивної потужності і стабілізації напруги (рис. 13.5). На заводську підстанцію подається напруга 110 кВ і за допомогою заводської підстанції знижується до 20 кВ. В систему електропостачання печі введено фільтр-компенсувальну установку, від якої живлення подається на пічну підстанцію, обладнану вбудованим реактором і пічним трансформатором.

В табл.3.33 наведено рекомендації з номінальної потужності трансформатора для печей різної місткості фірми Mannessmann Demag.

**Таблиця 3.33.** Характеристики дугових печей фірми Mannessmann Demag

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Місткість, т | 60-70 | 70-90 | 85-95 | 95-120 | 120-150 | 140-150 | 180-220 |
| Потужність  трансформатора, МВ⋅А | 30-45 | 40-48 | 50-65 | 55-66 | 75 | 90 | 120 |
| Питома електрична потужність, кВ⋅А/т | 500-640 | 530-570 | 590-680 | 550-580 | 500-625 | 500-645 | 550-670 |

Поряд з підвищенням питомої потужності трансформатора подальші вдосконалення електричного режиму електроплавки сталі спрямовано на визначення оптимального *співвідношення живильного струму і напруги*. Впровадження концепції технології вищого рівня викликало необхідність зміни співвідношення струм – напруга вбік різкого збільшення робочої напруги від 350-400 В до 700-850 В. Це викликано насамперед необхідністю забезпечення значного підвищення активної потужності електропечі протягом всієї плавки в рамках технології вищого рівня. Зміна параметрів живильного струму вбік збільшення напруги стало можливим завдяки технологічним удосконаленням (наведенням спінених шлаків), що докладно розглянуто раніше, а також конструктивній зміні електропечі.

***Удосконалення конструкції печі***

Розвиток електропечебудівництва триває в напрямку створення печей нового покоління. Це високопотужні печі з питомою потужністю трансформатора до 1 МВ⋅А/т (для 100-тонної печі потужність трансформатора досягає 96 МВ⋅А), з попереднім підігрівом брухту, двохванні печі з одним струмопідводящим вузлом, поміщені в пилошумоізолюючий кожух, печі з сифонним, донним центральним або еркерним (ексцентреним) вузлом, що забезпечує безшлаковий випуск сталі, з водоохолоджуваними стінами і склепінням, з інжекційними і пальниковими пристроями, що обслуговуються маніпуляторами та іншим допоміжним устаткуванням, яке забезпечує проведення високошвидкісних плавок.

*Переваги печей нового покоління* полягають у наступному: 1 – забезпечення безшлакового випуску металу; 2 – забезпечення технології плавки із залишенням болота металу на подині; 3 – зменшення кута нахилу печі до 28-30о; 4 – зменшення довжини гнучких кабелів короткої мережі на 15-20%; 5 – скорочення тривалості циклу плавки за рахунок підвищення потужності і прискорення операції випуску; 6 – зменшення частки поверхні стін (на 22%) і склепіння (на 60%) футерованих цеглою, з одночасним збільшенням частки поверхні стін і склепіння, охолоджуваних водою; 7 – зниження витрати вогнетривких матеріалів на 2,5-3,5 кг/т; 8 – зниження витрати торкретировочної маси на 2 кг/т; 9 – зменшення довжини струменя на випуску до 2 м і забезпечення його компактності, зниження вторинного окислення металу; 10 – зменшення перегріву металу в печі на 30оС; 11 – скорочення витрати електроенергії на 20-25 кВт⋅г/т за рахунок зниження перегріву металу; 12 – зниження витрати електродів; 13 – збільшення стійкості ковшів в 1,5-2 рази; 14 – забезпечення випуску металу в ківш закритий кришкою (можливість одночасного вакуумування); 15 – збільшення місткості печі на 12-15% за рахунок зниження товщини футеровки при установці водоохолоджуваних панелей; 16 – збільшення стійкості вогнетривкої подини на 500-1000 плавок за рахунок постійного її вкриття рідким металом; 17 – забезпечення можливості повного спорожнювання печі; 18 – скорочення пилогазових викидів при розливці на 50%; 19 – збільшення продуктивності печі за рахунок скорочення тривалості плавки, більшої місткості печей, підвищення введеної потужності; 20 – зниження експлуатаційних витрат.

Далі докладно будуть розглянуто конструктивні і технологічні рішення окремих вузлів і елементів ДСП.

***Установки для безшлакового випуску сталі з ДСП***

Роль окислювального шлаку при попаданні його в ківш на випуску розглянуто в попередній главі при описі технології вищого рівня. Основний негативний вплив шлаку, не з огляду на інші сторони, проявляється в рефосфорації, тобто у зворотному переході фосфору в метал. Шляхи запобігання рефосфорації або зниженню її ступеню, коли немає можливості реконструювати або побудувати нову ДСП, будуть розглянуті далі.

*Система стопорного випуску сталі.* На початку 70-х років було запропоновано використовувати стопорний механізм для перекриття випускного отвору ДСП. Сутність процесу полягає в тому, що наприкінці випуску металу з печі при виході перших порцій шлаку випускний отвір по ходу випуску перекривається за допомогою стопорного механізму. Механізм являє собою металевий стрижень, на кінець якого нагвинчується насадка з вогнетривкого матеріалу. Стрижень закріплюється на дугоподібній цапфі, шарнірно з'єднаною з корпусом печі. Після повернення ДСП у вихідне положення стопор убирається, заміняється вогнетривка насадка, а випускний отвір заправляється вогнетривкою масою. Недоліком цього методу явилася ненадійна робота стопорного вузла, обумовлена труднощами його обслуговування, просочуванням шлаків через нещільність прилягання насадки. На зміну цьому методу прийшли інші більш досконалі.

*Система сифонного випуску сталі.* Установка для випуску сталі складається з коробки, яка включає нерухливу і рухливу плиту та стакан, що вставляється у вихідний канал випускного отвору всередину печі і який набирається з вогнетривких кілець. Цей пристрій збирається поза піччю, а на печі проводиться лише очищення плити і закривання отвору, що можна робити на працюючій печі. Для заміни пристрою необхідно всього лише 25 хв, причому 5-10 хв при відключеній печі. На виготовлення сифонного затвора потрібна вогнетривка магнезитова цегла, встановлена навколо каналу всередині печі. Закриття каналу здійснюється дробленим вапном. Нахил каналу на 10о вбік робочого вікна дозволяє працювати з відкритим каналом і забезпечує гарну кінематику струменя. Ківш з металом встановлюється на самохідний візок, який зважує.

Розрізняють два методи роботи печі з сифонним випуском сталі. Перший стосується плавки сталі, для якої не потрібно залишати велике болото металу. В цьому випадку шибер закривається з моменту, коли оператор побачить шлак у випускному каналі. Кількість шлаку, яке попадає в ківш, не перевищує 200 кг і на подині залишається не більше 1,5 т рідкого металу. Другий варіант допускає залишок металу в печі від 2 до 3-х тонн. В цьому випадку закриття шибера випускного каналу здійснюється, коли вага металу в ковші, встановленому на самохідний візок, який зважує, досягає заданої величини і шлак практично не попадає в ківш. Операція поділу шлаку і металу відсутня. При гарній підготовці обслуговуючого персоналу і ретельному обслуговуванні після кожної плавки пристрій служить протягом всього строку роботи печі.

Для електросталеплавильників даний метод розділу металу і шлаків з'явився істотним прогресом в технологічному і економічному плані. В технологічному плані це дозволило знизити на 30-40оС температуру металу на випуску, прискорити рафінування металу, усунути перемішування металу в ковші з пічним шлаком, усунути змішування пічних шлаків з рафінувальним шлаком, полегшило процес дефосфорації, знижуючи нижню межу по фосфору. Теоретично можливо одержання фосфору нижче 0,002% (20 ррm) перед випуском з печі і підтримка його на рівні 0,0025% (25 ррm) до подачі на підігрів. Незважаючи на присадку феросплавів це дозволяє мати готовий метал з вмістом нижче 0,0045% (45 ррm) фосфору при будь-якому вмісті сірки і водню. Крім того, зниження часу рафінування, усунення переливу сталі з ковша в ківш поліпшують противоазотну обробку, що дозволяє поряд з поліпшенням якості сталі по Р, S і Н2 одержати вміст азоту менш 0,0045% (45 ррm) у промислових умовах.

В економічному плані можна одержати наступні результати: - скорочення загальної витрати електроенергії (електропіч, ківш-піч) до 10%; зниження витрати електродів (електропіч, ківш-піч) до 13%; скорочення загальної витрати вогнетривів до 10%; скорочення витрати вапна, плавикового шпату до 16%; зниження витрати вихідної завалки на 2%. Витрати на експлуатацію і виготовлення шиберного пристрою становить не більше 12% від отриманого економічного ефекту. Крім всього іншого, необхідно відзначити істотне поліпшення умов праці по обслуговуванню випускного каналу і в зв'язку з ліквідацією операції переливу металу з ковша в ківш для відсічення шлаку.

*Донний випуск сталі.* Технічним рішенням проблеми відсічення шлаку на випуску більш високого рівня є обладнання ДСП донним випуском сталі з ексцентренним розташуванням випускного отвору, обладнаного шиберним затвором.

Наявність ексцентренного випускного отвору дозволяє виключити перелив металу з ковша в ківш перед позапічною обробкою сталі, знизити на 30оС температуру металу на випуску. З іншої сторони дана конструкція обмежує нахил печі до 15о і зменшує висоту вогнетривкого гарнісажу стін печі. Але еркерну зону потрібно додатково обігрівати за допомогою паливно-кисневих пальників. Кількість шлаку, що попадає в ківш, становить у середньому 200 кг, досягаючи рідко 300-400 кг. Рефосфорація між піччю і рафінуванням у ковші доходить від 0,003 до 0,005%, на рівні того, що спостерігається при переливі з ковша в ківш, з урахуванням добавок, які вводяться в ківш.

Фірма Fuchs Systemtechnik (Німеччина) розробила нову систему безшлакового випуску сталі з дугової печі FAST, що виключає нахил печі при випуску сталі.

При використанні системи FAST нема необхідності заповнювати випускний отвір вогнетривким матеріалом при відключенні електроживлення. Цю операцію можна проводити при роботі печі під струмом; піч можна не відключати і у період випуску. Це дозволяє скоротити тривалість плавки від випуску до випуску приблизно на 5 хв, відповідно зменшуються витрати виробництва.

***Вогнетривка футеровка ДСП***

Зміна конструкції дугових печей привела до корінної зміни футеровки ДСП. Сучасна ДСП має 2 види футеровки: – *водоохолоджувана* частина і *вогнетривка* частина.

*Вогнетривка футеровка* дугової сталеплавильної печі включає наступні ділянки: стіни, подину, склепіння, робоче вікно, випускний отвір. Для кожної ділянки застосовуються матеріали відповідні теплофізичним і термохімічним параметрам процесів, які відбуваються в даній зоні. Футеровка всіх ділянок крім склепіння складається з арматурного і робочого шарів.

*Футеровка стін.* Залежно від умов, в яких перебувають вогнетриви, у футеровці стін можна виділити наступні ділянки:

- *нижня частина стін* – ділянка футеровки, що контактує з металом;

- *шлаковий пояс* – ділянка стін до рівня порога, що піддається впливу шлаку;

- *верхня частина стін* – ділянка стін вище рівня порога; тут виділяються зони підвищеного зношування, розташовані напроти електродів і піддані впливу електричних дуг.

Від теплопровідності вогнетривів залежить швидкість і глибина спікання набивного шару стін і подини печі.

*Арматурний шар стін* виконується з обпаленої периклазової цегли, яка не містить залишкового вуглецю, на периклазовмісному порошку – мертелі (табл. 3.34, 3.35).

**Таблиця 3.34.** Фізико-хімічні властивості вогнетривів для арматурного шару

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Призначення | Вміст, % | | | | Темпер.  експл., оС | Об’ємна маса, кг/м3 | Порис-тість, % | Межа міцн.,  N/mm2 |
| MgО | SiО2 | CaО | Fe2O3 |
| Арматура | >90 | <0,8 | 2 | 5-6 | >1750 | >3 | <18 | >60 |

**Таблиця 3.35.** Фізико-хімічні властивості мертелю

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | | Темпер.  експл,  оС | Фрак-ція,  мм | Добавка води, % | Зв'язка |
| MgО | Al2O3 | CaО | SiО2 | Fe2O3 |
| Мертель\* периклазовий | >90 | 0,3 | 2 | 0,5 | 5-6 | >1750 | 0-0,2 | 20-25 | сульфатна |

*\* - у сухому виді служить для заповнення зазорів між цеглинами*

Для *робочого шару* використовують периклазовуглецеві вогнетриви, виготовлені з високостійкого спеченого периклазу (з часток електроплавленого периклазу порядку 30-70%) із залишковим вмістом вуглецю 5-17%. Шлакову зону підсилюють цеглою, виготовленою зі спеченого і плавленого периклазу в співвідношенні 1:1 з добавкою лускатого графіту (табл.3.36).

**Таблиця 3.36.** Фізико-хімічні показники вогнетривкої цегли робочого шару стін

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Призначення | Вміст, % | | | | | Сзал,  % | Об’ємна маса,  кг/м3 | Порис-  тість,  % | Межа  міцн.,  N/mm2 |
| MgО | Al2O3 | SiО2 | Fe2O3 | CaО |
| Нижня частина стін | >90 | 0,1 | 0,8 | 0,2 | 2 | 5 | >3,0 | 4 | >45 |
| Нижня частина стін | >90 | - | <0,8 | 5-6 | 2 | - | >3,0 | <18 | >60 |
| Шлаковий пояс | >97 | 0,2 | 0,6 | 0,4 | <2 | 10-13 | >3,0 | 4 | >35 |
| Верхня частина стін | >97 | 0,2 | 0,6 | 0,2 | <2 | 10 | >3,0 | 4 | >35 |
| Гарячі зони | >97 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | <2 | 14 | >3,0 | 4 | >35 |

*\*Для периклазовуглецевих виробів розбіг по висоті – не більше 0,5 мм, кладка насухо.*

Гарячі зони футерують периклазовуглецевою цеглою з вмістом залишкового вуглецю 10-15% і 95-97% MgО з добавкою 50% і більш плавленого периклазу. В інших ділянках верхньої частини стін застосовують менш стійку периклазовуглецеву цеглу на пековій зв'язці без застосування плавленого периклазу з вмістом MgО 97% і залишкового вуглецю порядку 10-12%. Для нижньої частини стін (зона з найменшим навантаженням) використовується периклазовуглецева цегла на пековій зв'язці з вмістом залишкового вуглецю 5%, у рідких випадках – безвуглецевий. Кладку робочого шару стін ведуть насухо до арматурного шару без зазорів, при необхідності вирізуючи замкову цеглу.

У верхній частині стін застосовується набивна магнезіальна маса (табл. 3.37).

**Таблиця 3.37.** Фізико-хімічні властивості набивної маси

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Призначення | Вміст, % | | | | | Темпер.  експл.,  оС | Фрак-ція,  мм | Добавка води, % | Зв'язка |
| MgО | Al2O3 | CaО | SiО2 | Fe2O3 |
| Верх стін | >90 | 0,5 | <2 | <3 | <6 | >1750 | 0-5 | 4-6 | сульфатна |

*Футеровка подини. Арматурну футеровку* виготовлено з тієї ж цегли і тієї ж якості, що й для стін. Кладка ведеться насухо з засипанням швів периклазовим порошком дрібної фракції.

*Для робочого шару футеровки подини* застосовують периклазові або периклазовапняні набивні маси. Матеріалом, який рекомендується, для подин електродугових печей є суха набивна маса, заснована на високощільному обпаленому магнезиті типу Ankerharth з вмістом 75% MgО і 20% СаО. Ця маса дозволяє виконати будь-який необхідний для роботи профіль подини. Для гарячих ремонтів застосовується аналогічна маса з підвищеною спікливістю, завдяки підвищеному вмісту Fe2O3 (табл. 3.38).

**Таблиця 3.38.** Фізико-хімічні властивості робочого шару подини

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | Темпер.  експл., оС | Фракція, мм |
| MgО | CaО | SiО2 | Fe2O3 |
| Набивна маса | 75-77 | 18-20 | <0,6 | 3,5-4 | >1750 | 0-5 |
| Маса ремонтна | 77-85 | 8-16 | <0,6 | 5,5 | >1750 | 0-8 |

Крім того, для наварки, ремонту, заправки застосовують торкретмаси, порошок периклазовий як у сухому, так і в суміші з водяним розчином рідкого скла (табл. 3.39).

Стійкість робочого шару подини при використанні вогнетривкої маси фірми “Veitsich-Radex” становить більше 4000 плавок. Максимальний результат, досягнутий в умовах ММЗ, склав більше 6000 плавок, а для стін більше 650 плавок.

**Таблиця 3.39.** Фізико-хімічні характеристики подових набивних мас різних виробників

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Виробник, тип маси | | | |
| «Магнезит» | | « Veitsich-Radex» | Kumas |
| ППЕ-88 | ППЕ-90 | Ankerharth | Kumarc |
| Масова частка, %: |  | | | |
| MgО | ≥88 | 92,8 | 74-77 | 80-88 |
| CaО | ≤4 | 2,73 | 18-20 | ≤10 |
| SiО2 | ≤4 | 2,01 | 0,5 | ≤3 |
| Fe2O3 | - | - | 3, 5-5,5 | ≤5 |
| Зерновий склад, %: |  | | | |
| >4 мм | ≤5 | ≤5 | 0-8 | 0-8 |
| >1 мм | 50-80 | 42,2 | - | - |

*Футеровка склепіння* ДСП повинна мати високу механічну міцність, високу вогнетривкість. Склепіння піддається впливу високих температур, окисної атмосфери печі, тепловому випромінюванню від палаючих дуг. Тому для футеровки склепіння найбільш прийнятні мулітокорундові, бокситові або корундові вогнетриви (як цегла, так і бетони) (табл. 3.40, 3.41). Для кладки цегли застосовується мертель мулітокремнеземистий, мулітокорундовий на алюмофосфатній, алюмохромфосфатній або керамічній зв'язці.

**Таблиця 3.40.** Фізико-хімічні властивості мас для склепіння

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | | | Темпер.  експл, оС | Фрак-  ція, мм |
| MgО | Al2O3 | CaО | SiО2 | Cr2O3 | Fe2O3 |
| Торкретмаса | >90 | 0,3 | 2 | 1,5 | 2 | - | >1750 | 0-5 |
| Тиксотропний бетон | - | >80 | 2,1  TiО2 | <15 | - | <1,5 | 1700 | 0-6 |
| Мертель | - | >55 | - | 40 | - | 1,5 | 1600 | 0-0,5 |

**Таблиця 3.41.** Фізико-хімічні властивості вогнетривких виробів для склепіння

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | | Об’ємна маса,  кг/м3 | Порис-тість,  % | Межа міцн.,  N/mm2 |
| Al2O3 | MgО | SiО2 | Fe2O3 | Cr2O3 |
| Цегла | >95 | - | 1,25 | <2 | 3 | >2,9 | 17 | >100 |

Все більше поширення одержують склепіння з бетонних блоків з виконаними в них електродними отворами. Такі склепіння відрізняються високою стійкістю, простотою установки. Звичайно футеровка зводиться до точного монтажу краном трьох сегментів, таким чином, щоб електродні отвори збіглися з мітками на шаблоні. Зазори заповнюють бетоном.

*Футеровка робочого вікна.* Кладка вогнетривів робочого шару в районі робочого вікна не розклинена. Вогнетривкі вироби встановлюють на закругленні з малим радіусом, застосовуючи або спеціальні формати, або встановлюючи клинову цеглу гострим торцем до кожуха. У футеровці робочого вікна застосовують цеглу обпаленого периклазу, який не вміщує залишкового вуглецю і периклазовуглецеву цеглу (табл. 3.42). Футеровка робочого вікна ДСП повинна мати високу механічну міцність, високу вогнетривкість.

**Таблиця 3.42.** Фізико-хімічні властивості вогнетривів робочого вікна

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | | Сзал,  % | Об’ємна  маса,  кг/м3 | Порис-  тість,  % | Межа  міцн.,  N/mm2 |
| MgО | Al2O3 | SiО2 | Fe2O3 | CaО |
| Периклазовугле-  цевий | >95 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | <1,5 | 5 | >2,9 | <8 | >50 |
| периклазовий | >90 | - | <0,8 | 5-6 | 2 | - | >3,0 | <18 | >60 |

*Футеровка випускного отвору.* Випускний отвір формується за допомогою вогнетривів підготовлених форматів. Матеріали, з яких виготовляють дані вироби, повинні мати гарну термостійкість і опір фізико-хімічним впливам (табл. 3.43). Футеровка випускного отвору складається з гніздових блоків, які працюють протягом всієї кампанії, замінних кілець і втулки, з отворами необхідного діаметра. До вогнетривів випускного отвору пред'являються підвищені вимоги: відкрита пористість порядку 4%, межа міцності на стиск 50-65 Н/мм2. Гніздові блоки виготовляють на пековій зв'язці з плавленого і крупнокристалічного периклазу, втулки і кільця – на зв'язці з синтетичних смол із застосуванням високочистих синтетичного або спеченого периклазу з добавкою антиоксиданту.

**Таблиця 3.43.** Фізико-хімічні властивості вогнетривів випускного отвору

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | | Сзал,  % | Об’ємна маса,  кг/м3 | Порис-  тість,  % | Межа  міцн.,  N/mm2 |
| MgО | Al2O3 | SiО2 | Fe2O3 | CaО |
| Периклазовуг-лецевий | >97 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | <2 | 5-6 | >3,0 | 4 | >45 |

*Вогнетривкі матеріали країн СНД.* В умовах електрометалургійних заводів України найчастіше використовуються вогнетривкі матеріали підприємств країн СНД, фізико-хімічні характеристики яких наведено в табл. 3.44-13.48.

**Таблиця 3.44.** Фізико-хімічні характеристики вогнетривів для арматури стін і подини

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | Об’ємна маса,  кг/м3 | Порис-тість,  % | Межа  міцн.,  N/mm2 |
| MgО | SiО2 | CaО | Fe2O3 |
| П-91 | >91 | <3 | <3 | <2,5 | >3 | <22 | >60 |

**Таблиця 3.45.** Фізико-хімічні характеристики мертелю

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | Фракція, мм | Добавка води, % |
| MgО | Cr2O3 | CaО | SiО2 |
| МПВ | >80 | >4 | <3 | <3 | 0-0,5 | 20-25 |

*\* - у сухому виді служить для заповнення зазорів між цеглинами*

**Таблиця 3.46.** Фізико-хімічні характеристики мас робочого шару подини

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | Темпер.  експл, оС | Фракція, мм |
| MgО | CaО | SiО2 | Fe2O3 |
| Набивна маса | 75-77 | 18-20 | <0,6 | 3, 5-4 | >1750 | 0-5 |
| Маса ремонтна | 77-85 | 8-16 | <0,6 | 5-7 | >1750 | 0-8 |
| ППЕ-88 | >88 | <4 | <4 | - |  |  |

**Таблиця 3.47.** Фізико-хімічні характеристики вогнетривів для робочого шару стін і випускного отвору

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | MgО, % | Сзал, % | Об’ємна маса, кг/м3 | Пористість, % | Межа міцності, N/mm2 |
| ПУПЕ | >90 | 8-20 | >2,8 | <8 | >30 |
| БПГЕ | >90 | 10-25 | >2,7 | <8 | >25 |

**Таблиця 3.48.** Фізико-хімічні характеристики вогнетривких виробів для склепіння

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | Вміст, % | | | | | Об’ємна маса, кг/м3 | Порис-тість, % | Межа міцн., N/mm2 |
| Al2O3 | MgО | SiО2 | Fe2O3 | Cr2O3 |
| Цегла | >80 | - | 12,5 | <2 | 3 | >2,9 | 17 | >100 |

***Водоохолоджувані елементи футеровки ДСП***

Інтенсивне введення електроенергії в ДСП забезпечується завдяки застосуванню водоохолоджуваних елементів печі – стін і склепіння.

*Водоохолоджувана футеровка стін ДСП.* Для армування стін використовують, в основному, трубчасті і коробчасті елементи, виконані зі сталі або міді. Систему охолодження формують з окремих елементів, що полегшує контроль їх стану і обслуговування. У найбільш гарячих зонах встановлюють елементи з міді, попередньо наносячи на них шар вогнетривкої обмазки товщиною до 50 мм. Робота печі на спінених шлаках сприяє утворенню гарнісажу, що забезпечує довгострокову роботу охолоджуваних елементів стін печі. Останнім часом найбільше поширення одержали трубчасті мідні елементи стін печі. Їх стійкість досягає 8, 5-15 тис. плавок. Застосування водоохолоджуваних елементів стін печі в 10-15 разів знизило витрату вогнетривів, зменшило на 10-15% витрату графітованих електродів, спростило зміст профілактичних і капітальних ремонтів і збільшило робочий ресурс печі більш ніж на 20%.

*Водоохолоджуване склепіння ДСП.* Розробка водоохолоджуваного склепіння дозволила зменшити вогнетривку частину, обмеживши її центральною зоною навколо електродів. Останнім часом розроблено нову конструкцію водоохолоджуваного «циклонного склепіння», яке виконано у вигляді послідовно розташованих спіральних секторів з водоохолоджуваних труб, що утворюють порожній тороїд. Різний шаг розташованих труб стосовно головного вихідного патрубка ініціює в печі вертикальний, низькошвидкіснийі однорідний потік газу, зменшуючи тим самим захват твердих часток у систему газовідсосу і збільшуючи теплообмін у печі між гарячими газами, що відходять, і металобрухтом, який не розплавився.

Застосування водоохолоджуваного склепіння підвищило строк його служби, полегшило розміщення в ньому отворів під газовідвідний патрубок і під тічку для присадки сипучих і кускових матеріалів. Для охолодження стін і склепіння печі витрата води становить 6-9 т/м2⋅г. Застосування системи випарного охолодження печі дозволяє додатково одержувати до 7 т/г сухої енергетичної пари.

***Удосконалення конструкції електродів***

Підвищення питомої потужності дугових печей потребувало поліпшення якості електродів з метою підвищення припустимої щільності струму з 15-20 до 25-30 А/см2, підвищення механічної і термічної стійкості графітованих електродів і зниження їх питомого электроопору.

В структурі витрат по переділу в дугових сталеплавильних печах на частку електродів доводиться 8-14% загальних витрат. Технологія вищого рівня, що забезпечує різке зниження тривалості плавки за рахунок інтенсифікації підведення енергії, дозволила значно знизити витрату електродів пропорційно тривалості плавки. Зниження витрати електродів при підвищенні потужності відбувається за рахунок зменшення сили струму, що у значній мірі впливає на торцеву витрату електродів, і росту напруги.

Витрата електродів іде з торця (Стор) і з бокової поверхні (Сбок) і описується емпіричними рівняннями:

,

,

де: I – середній струм на фазу за плавку, кА; t – час плавки, год; Δt – час зайнятості печі без підводу потужності; d – діаметр кінця електрода, м; D – початковий діаметр електрода, м; L – довжина окисленого конуса електрода, м; x - питома швидкість окислення, кг/м2⋅г, яка при 800оС дорівнює 2,5; при 1200оС – 8,0 і 1600оС – 10 кг/м2⋅г.

Таким чином, витрата електродів визначається часом плавки, підведеною силою струму, величиною поверхні електродів і її температурою. Для зменшення бічного окислення запропоновано використовувати захисні покриття поверхні електродів в основному порошками алюмінію, оксиду алюмінію і графіту, а також карбіду кремнію на борній зв'язці та інші склади. Покриття наноситься або попередньо до установки електрода, або за допомогою спеціальних іплікаторів на розігріті кінці електродів. Застосування покриттів дозволяє на 15-20% знизити витрату електродів. Однак економія повинна покриватися витратами на напилювання, що не завжди реалізовано. Зниження витрати електродів повинно перевищувати 15%, щоб компенсувати витрати на металізацію. Пошуки шляхів зменшення площі бічної поверхні та омічного опору електродів виявили ще один напрямок – використання охолоджуваних електродів. При їх застосуванні витрата графітованих електродів знижується на 24%, збільшується продуктивність печі на 3%, знижується витрата електроенергії на 0,6%. В останні роки розробляються комбіновані водоохолоджувані електроди, що складаються з металевої і графітної частин у сполученні з поверхневим покриттям графітної частини, а також використовується охолодження водою частини електрода, яка виступає з печі, що знижує витрату електродів на 10-15%.

***Застосування альтернативних джерел тепла***

Витрата електроенергії є однією з основних витратних статей при роботі ДСП, тому останнім часом все більше уваги приділяється питанням заміни електроенергії іншими джерелами тепла. Однак, при цьому необхідно об'єктивно враховувати ціни на різні види енергоносіїв. Треба, насамперед, визначитися, що при будь-якому процесі плавки існує об'єктивна складова витрати електроенергії. Вона пов'язана з технологічними особливостями сталі і шлаку, тобто тепло витрачається для створення необхідних фізико-хімічних властивостей металевого і шлакового розплаву, яке уноситься з печі і становить в середньому для технології вищого рівня близько 440 кВт⋅г/т (рис. 13.18) і для звичайної технології двохшлаковим процесом – порядку 511 кВт⋅г/т.

Відповідно до балансу (табл. 3.49) стаття приходу енергії складається з електроенергії, яка підводиться у ДСП за допомогою графітованих електродів від пічного трансформатора, енергії альтернативного палива і хімічних реакцій окислення вуглецю, фосфору, кремнію, марганцю і заліза. Основна кількість енергії витрачається на плавлення металу і шлаку та їх нагрів до необхідних температур.

**Таблиця 3.49.** Енергетичний баланс виплавки сталі за класичною технологією в ДСП

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Прихід енергії, кВт⋅г/т | | | Витрати енергії, кВт⋅г/т | | |
| Стаття приходу | Вели-чина | % | Стаття витрат | Вели-  чина | % |
| Електроенергія | 556,7 | 68,7 | уноситься рідкою сталлю | 428 | 52,7 |
| Паливо і хімічні реакції, в т.ч.:  - паливно-кисневі пальники  - хімічні реакції  - окислення електродів  - окислення карбюризаторів  - окислення масел і заліза брухту | 254,0 | 31,3 | уноситься шлаком | 83 | 12,2 |
| електричні втрати | 32 | 4,0 |
| 21,0 | 2,6 | втрати з охолодженою водою, в т.ч.:  - охолодження верхньої частини печі охолоджувальними елементами  - охолодження склепіння  - охолодження газовідводящего патрубка  - втрати через футеровку | 86 | 10,6 |
| 46,6 | 5,1 | 50 | 6,2 |
| 31,6 | 3,9 |
| 83,4 | 10,3 |
| 26 | 3,2 |
| 76,4 | 9,4 | 10 | 1,2 |
| 24 | 3,0 |
| втрати з газами, які відходять, в т.ч.:  - через газовідводящий патрубок  - через нещільності печі | 158 | 19,5 |
| 107 | 13,2 |
| 51 | 6,3 |
| ВСЬОГО: | 811 | 100 | ВСЬОГО: | 811 | 100 |

Однак, загальні втрати енергії становлять близько 35%, причому, приблизно 20% з них губиться з газами, що відходять. Інша енергія, яка підводиться, витрачається на компенсацію втрат в електромережі, випромінювання і з охолоджуваною водою. Необхідно, в першу чергу, використовувати тепло газів, що відходять. Поряд з проблемами загального зниження витрати енергії ставиться завдання по можливій заміні, максимальних за вартістю енергоносіїв, альтернативними.

В цьому аспекті в останні 10-15 років розробляються і впроваджуються різні схеми та пристрої по заміні електроенергії іншими видами, по вторинному використанню теплової енергії, яка уноситься пічними газами і водою, по зниженню витрати різних енергоносіїв на електроплавку сталі. З цією метою *застосовуються паливно-кисневі пальники, кисневі фурми для вдування кисню в метал, сопла «гострого дуття» кисню для доопалювання СО і Н2*, *інжекційні пристрої для вдування вуглецевого пилу*. Призначення і використання кожного з видів пристроїв визначається прийнятою технологією і виплавленою маркою сталі.

Застосування в ДСП чистого або в суміші з паливом кисню дозволяє підвищити продуктивність печей і понизити витрату електроенергії. Витрата кисню в ДСП досягає 40 м3/т сталі, що становить 60% від витрати кисню в кисневих конвертерах. За деякими оцінками при витраті кисню 20 м3/т економія електроенергії в ДСП становить 60 кВт⋅г/т, а частка енергії, внесеної киснем і природним газом, досягає 15-18% від загальної її витрати. Застосування кисню стає особливо вигідним при переході до нового імпульсно-адсорбційного способу його одержання, що у порівнянні з традиційним простіше і дешевше, хоча забезпечує одержання 95%-ого кисню, однак, цілком придатного для одержання сталі. Для подачі газоподібних продуктів в стінах ДСП встановлюють 4-6 паливно-кисневих пальників (ПКП) з комп'ютерним регулюванням режиму подачі кисню, повітря, природного газу залежно від поточного складу атмосфери печі.

Застосування кисню при електроплавці сталі особливо різко зросло в останні 15-20 років, що дозволило значно знизити витрату первинної електроенергії. В дуговій печі існує 3 зони в міжелектродних просторах з порівняно меншим тепловим потенціалом, де швидкість плавлення брухту значно нижче, ніж у приелектродних зонах. Для усунення цих перекосів застосовують стаціонарні або поворот, які можуть працювати на рідкому (гас) і газоподібному паливі.

*Існують два варіанти використання ПКП* – «*одностадійний процес*», коли вони працюють паралельно з дугами, і «*двохстадійний процес*», коли включенню дуг передує тривалий період інтенсивного підігріву шихти потужними ПКП.

Оптимізація процесу плавки в печі місткістю 100 т вимагає 2,5-3,0 кг рідкого палива і 9 м3 кисню на тонну сталі та забезпечує приріст продуктивності від 10 до 30%.

*Факельно-дугові сталеплавильні печі* відрізняються спеціально підібраними співвідношеннями геометричних розмірів робочого простору з урахуванням переробки шихти з досить малою насипною масою. Працюють ці печі за варіантом «двохстадійний процес», коли включенню дуг передує досить тривалий період інтенсивного підігріву шихти потужними ПКП. Ця конструкція особливо вигідна в порівнянні з великими малопотужними печами, з тривалим періодом плавлення. Надпотужна ДСП місткістю 175 т і потужністю трансформатора 120 МВА, яка виплавляє сталь високої якості, обладнана пальниками з роздільним регулюванням витрати природного газу, повітря, кисню. Три пальники, спрямовані по радіусу, монтуються на болтах на водоохолоджуваних панелях стін у холодних місцях печі на 762 мм вище рівня металу. Водоохолоджувані пальники мають глибокі камери згоряння самоочисного типу. Їх застосування збільшило продуктивність ДСП приблизно на 12%, скоротило витрату електродів на 230-320 г/т сталі.

В табл. 3.50 і 3.51 наведено середню тривалість періодів і плавки в цілому, а також середню витрату енергоносіїв і електродів для надпотужної 80-тонної ДСП, яка працює за технологією вищого рівня (ДСП-АКОС). Піч обладнана трансформатором потужністю 75 МВ⋅А, сімома паливно-кисневими пальниками по 2,4 МВТ, чотирма соплами для доопалювання газу СО, двома фурмами для введення кисню і інжектором для введення вуглецю.

**Таблиця 3.50.** Середня тривалість періодів плавки сталі в ДСП-80

|  |  |
| --- | --- |
| Період | Час, хв |
| Робота під струмом | 32 |
| Відключення дуг, в тому числі:   * завантаження першої корзини * завантаження другої корзини * випуск * обслуговування печі * перепуск електродів | 10 |
| 2 |
| 2 |
| 2 |
| 3 |
| 1 |
| Простої | 3 |
| Тривалість плавки | 45 |

**Таблиця 3.51.** Середня витрата енергоносіїв і електродів на 1 т рідкої сталі, виплавленої в ДСП-80

|  |  |
| --- | --- |
| Витрата | Значення |
| Кисень, нм3:   * на продувку * на доопалювання * на пальники |  |
| 18 |
| 11 |
| 13 |
| Природний газ, нм3 | 5 |
| Вуглець, кг | 12 |
| Електроенергія, кВт⋅г | 380 |
| Електроди, кг | 1,7 |

В Англії працює завод з двох технологічних ліній, кожна з яких включає 70-тонну електропіч, обладнану трансформатором потужністю 68 МВА. Піч має ексцентриковий донний випуск металу, струминне охолодження склепіння, три киснево-паливні пальники, дві фурми для вдування кисню і одну для вугілля з маніпуляторами та дистанційним управлінням. Піч обладнано електродотримачами з алюмінію, застосовано струминне охолодження електродів. Витрата електродів на електропечах – 1,9 кг/т і на АКОС – 0,2 кг/т, витрата електроенергії – 410 кВт⋅г/т, виробництво на одного працюючого – 1100 т/рік.

З метою більш ефективного перемішування рідкої сталі, прискорення металургійних реакцій між металом і шлаком, вирівнювання температури ванни, скорочення тривалості плавлення брухту і рафінування, зниження витрати електроенергії при виплавці рядової сталі ведуть продувку ванни газом через пористі вставки, розміщені в подині. При цьому по закінченні плавки в печі залишають 10-30% металу, а газ, звичайно азот, вдувають протягом всієї плавки. В подину вставляється до 5 пористих вставок, які мають до 50 каналів діаметром 0,6-1,5 мм. Після завалки брухту при продувці газом під тиском 9 атм рідкий метал спучується на висоту до 1 м, заповнює простір між кусками брухту і прискорює його плавлення, віддаючи своє тепло. При цьому тривалість плавлення і рафінування скорочується на 10-15%, прискорюється рафінування металу від фосфору і сірки. Витрата електроенергії скорочується до 360 кВт⋅г/т, продуктивність збільшується на 20-25%, вихід придатного становить 90,2% при витраті азоту 1,24 нм3/т.

**Дугова сталеплавильна піч, обладнана системою «Данарк»**

З листопада 1996 р. на Молдавському металургійному заводі (ММЗ) вперше в СНД почата експлуатація 120 т електродугової печі, обладнаною системою «Данарк» фірми Даніелі (Італія), що дозволило в значній мірі підвищити її техніко-економічні показники (табл. 3.52) у порівнянні зі звичайними електросталеплавильними агрегатами.

**Таблиця 3.52.** Техніко-економічні показники роботи ДСП до реконструкції і після впровадження системи «Данарк»

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Показники | До реконструкції | Досягнуті |
| Номінальна потужність трансформатора, МВА | 80+12% | 80+12% |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 450 | 390 |
| Витрата кисню, нм3/т:  - пальниками  - списами  - донними фурмами | 16,5 | 22,4 |
| 8,1 | 5,3 |
| - | 3,7 |
| Витрата природного газу, нм3/т |  |  |
| - пальниками | 8,1 | 5,3 |
| - донними фурмами | - | 0,9 |
| Витрата електродів, кг/т | 3,2 | 1,9 |
| Тривалість плавки, хв | 85 | 66 |
| Тривалість плавки під навантаженням, хв | 72 | 48 |
| Продуктивність, т/г | 84,7 | 110,4 |

Розроблено конструкцію електросталеплавильної печі максимально пристосованої до використання негабаритного металобрухту. Піч обладнана пічним трансформатором 80 МВА+12%, має водоохолоджуване склепіння і кожух, який складається з 12 панелей, що значно збільшує стійкість всіх елементів печі. Еркерний випуск сталі запобігає потраплянню пічних шлаків у сталерозливочний ківш. Нове гідравлічне обладнання знижує тривалість простоїв печі пов'язаних із завантаженням брухту і випуском сталі.

На печі застосовується сучасна технологія виплавки із залишком рідкої сталі – «болота» у кількості 10-15 т. В якості шлакоутворюючого матеріалу використовується вапняк (50 кг/т). Застосування вапняку замість вапна істотно впливає на тривалість плавки, витрату електричної енергії і електродів. Вміст шкідливої домішки – фосфору в готовій сталі після випуску з печі повністю задовольняє вимогам стандартів на виплавлений сортамент металу. Конструкція печі і бадей для завантаження брухту дозволяє працювати, в основному, з однією підвалкою. Середня вага брухту, що завантажується у піч при цьому становить 135 т. В якості основного навуглецювача застосовується передільний чавун у кількості 15-20 т на плавку. Крім того, розроблено і освоєно технологію використання коксового дріб'язку для навуглецювання сталі.

Особливість системи «Данарк» полягає в правильному управлінні хімічними реакціями, які розвиваються всередині печі. Альтернативними джерелами – кисень, природний газ, окисні реакції, вноситься 40% від загальної кількості енергії на плавку. На відміну від звичайної печі, в якій частина теплового потенціалу, що втримується у вуглеці, губиться у відвідних газах, процес «Данарк» використовує тепло згоряння моноокису вуглецю всередині печі, що знижує енерговитрати і збільшує продуктивність агрегату.

При розташуванні спеціального устаткування для застосування альтернативних джерел енергії дотримується принцип досягнення рівномірного розподілу теплової енергії в робочому просторі печі. До складу устаткування ДСП, що працює за технологією «Данарк», входять:

- 4 кисневі фурми, розташовані в днищі; витрата кисню 800 нм3/г;

- надзвуковий спис настінної установки типу «Палмур», витрата кисню 3000 нм3/год, карбюризатора 20-40 кг/хв;

- 6 стінових газокисневих пальників; витрата кисню 4800 нм3/г;

- 2 системи подачі карбюризатора в сталевий розплав;

- реактор послідовного включення трансформатора;

- комп'ютерна система управління технологічним процесом.

В цей час електродугова піч дообладнана потужним дверним газокисневим пальником, витрата кисню 2400 нм3/г, природного газу – 1200 нм3/г і дверною кисневою фурмою з витратою кисню 3200 нм3/г, які розроблено і виготовлено на ММЗ.

*Фурми, розташовані в днищі печі.* Чотири донні фурми застосовуються для подачі кисню в сталеплавильну ванну, який використовується для рішення наступних задач:

* окислення вуглецю металевого розплаву;
* розплавлення скрапу в зонах, на яких не поширюється вплив електричних дуг і газокисневих пальників;
* перемішування рідкої сталі.

Донні фурми складаються з двох трубок. Центральна – виконана у формі восьмигранника з мідного сплаву, зовнішня – з нержавіючої сталі. Через зазор між ними подається охолоджувальна суміш, яка складається з азоту і природного газу, а через центральний отвір – кисень. У випадку аварійних зупинок печі, пов'язаних із заміною еркера або малого склепіння, система автоматично переходить на подачу азоту через центральний і зовнішній отвори. Зношування фурм контролюється системою теплового виявлення з двома термопарами, розташованими на відстані 350 і 450 мм від рівня днища, шляхом виміру температури футеровки фурм. При наявності нормальних умов середня питома витрата вогнетривів становить 0,6-0,7 мм на плавку. Середня стійкість донних фурм за результатами дослідної кампанії становить 286 плавок. Основним фактором, який впливає на зниження стійкості донних фурм, є перегрів сталі перед випуском плавки.

Використання донних фурм при виплавці сталі зменшує витрату електроенергії на 28-36 кВт⋅г/т, в т.ч. 20-24 кВт⋅г/т за рахунок перемішування сталевого розплаву і 8-12 кВт⋅г/т за рахунок участі газоподібного кисню в екзотермічних реакціях.

*Надзвуковий спис настінного типу «Палмур»* складається з кисневої фурми і вугільного списа. Фурма застосовується для зневуглецювання сталевої ванни, перемішування рідкої сталі за рахунок високої швидкості подачі кисню і доопалювання моноокису вуглецю. Вугільний спис використовується для навуглецювання сталі, утворення пінистих шлаків, що забезпечує можливість роботи на «довгих» дугах. Витрата карбюризатора при цьому становить від 20 до 40 кг/хв. Надзвуковий спис встановлюється на спеціальній площадці, прикріпленої до люльки печі, в точно визначеному нахиленому положенні для забезпечення необхідної глибини проникнення струменя кисню в сталеву ванну, а карбюризатора – у шлак. Таке конструктивне рішення є кращим у порівнянні з традиційною установкою маніпулятора і має наступні переваги: знижуються теплові втрати на початковій стадії плавки, тому що можливо тримати закритим робоче вікно; забезпечується вільний доступ для відбору проб і виміру температури сталі через робоче вікно.

*Стінові газокисневі пальники.* Працюють у двох режимах:

* на початковій стадії плавки працюють у режимі розігріву скрапу та розрізання брухту шляхом збільшення витрати кисню і газу;
* на наступній стадії пальники використовуються в першу чергу, як пристрої, які вдувають кисень для доопалювання моноокису вуглецю, що забезпечує виділення значної кількості теплової енергії.

На цій стадії витрата кисню поступово зменшується аж до припинення його подачі. Управління роботою пальників здійснюється в автоматичному режимі на підставі заданої програми, розробленої з метою одержання максимальної теплової енергії.

Пальники розташовано по дотичній до кожуха печі для створення вихрового потоку, який забезпечує повне доопалювання моноокису вуглецю. Дане розташування пальників знижує вплив кисню на електроди і сприяє зменшенню їх витрати.

*Система подачі карбюризатора* в сталевий розплав складається з двох стінових інжекторів. Один розташовано між панелями під кутом нахилу 35о і призначено для подачі карбюризатора на шлак, що забезпечує його швидке спінювання; другий розташовано під кутом 45о і використовується для подачі вуглецьвмісного порошку безпосередньо в метал, що дозволяє повторно навуглецьовувати сталевий розплав.

**Попередній підігрів брухту**

Ідея попереднього підігріву вихідної сировини не нова і різні варіанти

її досить тривалий час розробляються та застосовуються практично у всіх металургійних процесах, пов'язаних з виходом висококалорійних газів, що мають підвищену температуру. Всі розроблені і запропоновані способи можна умовно розділити на *2 групи*:

1 – підігрів брухту на окремо розташованій ділянці в завалочній корзині або в контейнері за рахунок тепла згоряння природного газу і за рахунок відхідних газів з печі;

2 – єдина конструкція ДСП – підігрівник брухту.

Гази, які відводяться з робочого простору дугової печі, несуть 15-20% енергії, споживаною технологічним процесом, що відповідає 100-150 кВт⋅г/т рідкої сталі. Ця енергія перебуває у вигляді хімічного потенціалу горючих компонентів СО і Н2 і фізичного тепла газів, які відходять з печі при температурі 800-1400оС.

По міркуванням безпеки цей газ перед вживанням необхідно допалювати або розбавляти до досягнення температури 600-700оС, що дозволить звичайні завантажувальні корзини застосовувати як контейнери для розігріву брухту. Реалізація цього процесу зменшує витрату електроенергії на 50 кВт⋅г/т; рідкого палива на 1,5 л/т; кисню на 4,5 м3/т; електродів на 0,4 кг/т; вогнетривів на 1,5 кг/т і скорочує відповідно тривалість плавки.

***Підігрів брухту без доопалювання відхідних газів***

Найбільш простий варіант полягає в подачі відхідних газів з температурою 1200оС у герметично закриту камеру підігріву, куди поміщено баддю або спеціальний контейнер з металобрухтом. Газ, проходячи через камеру, віддає тепло металобрухту, евакуюється з об'єму камери за допомогою димососа і подається в загальний колектор газів, які відходять. Неорганізовані викиди і відхідні гази з ДСП, змішуються в загальному колекторі і за допомогою іншого димососа направляються на газоочистку. Підігрівник брухту доцільно використовувати для однієї пари дугових печей. Коли в першій печі йде період плавлення шихти, у другій печі відбувається рафінування. Гази, які виходять з ДСП при температурі 1100-1400оС, направляються в підігрівник. З першої печі гази під час плавлення відсмоктуються через патрубок прямого відводу газу і направляються безпосередньо на газоочистку. Після закінчення плавки в другій печі скрап з камери підігріву подається на завантаження цієї печі. В цей час у першій печі починається рафінувальний період. Нова порція металобрухту поміщається в підігрівник і нагрівається за рахунок газу, що відходить від першої печі. Тиск у ДСП регулюється в різні періоди плавки за допомогою спеціальних засувок, розташованих на газовідвідних трубах.

***Підігрів брухту з попереднім доопалюванням відхідних газів***

. Газ, який виходить з печі через газовідвідний патрубок, захоплює через розтруб атмосферне повітря. При цьому відбувається окислення СО до СО2 за рахунок кисню повітря в камері горіння. Далі нагрітий газ подається або в камеру попереднього підігріву скрапу, або безпосередньо в газохід у систему газоочистки. Залежно від режиму роботи печі газ, що відходить з камери підігріву, може направлятися на газоочистку або вертатися в камеру доопалювання СО. Тиск у ДСП залежно від періоду плавки регулюється спеціальними засувками.

Газ, який відходить з ДСП, направляється в камеру згоряння, розташовану над камерою нагріву. В камері згоряння розташовано киснево-паливний пальник, сюди ж подається повітря, попередньо нагріте у рекуператорі. Рекуператор (металевий або керамічний) розташовано за камерою підігріву на шляху руху газу до системи газоочистки. Для регулювання тиску в ДСП, а також при непрацюючій системі підігріву, пічні гази за допомогою байпайсу можуть направлятися безпосередньо в рекуператор, де вони охолоджуються, і далі направляються в систему газоочистки.

Брухт в установку для підігріву завантажується поза пилошумоізолюючою камерою, потім підігрівник по рейках переміщається в закриту зону і брухт підігрівається відхідними газами, які поступають по газопроводу з отвору газовідводу у склепінні дугової печі. Після нагріву брухту установка – підігрівник переміщається на позицію завантаження і при поверненому склепінні ДСП відбувається завантаження підігрітої шихти в піч. При роботі за цією схемою дугової печі місткістю 40 т отримано економію електроенергії 40-45 кВт⋅г/т, в тому числі за рахунок економії електроенергії на газоочистку 15-20 кВт⋅г/т, зменшено витрати електродів на 0,4-0,6 кг/т і тривалість плавки на 7-8 хв, рівень шуму знижено до 80-90 Дб. До додаткових переваг можна віднести гарантовану подачу в піч просушеного вибухобезпечного брухту, стабілізацію електричного режиму періоду плавлення і зниження експлуатаційних витрат по газоочистці, приблизно на 30%. Підігрів металобрухту може також здійснюватися в тунельних печах, через які брухт пропускається в баддях, встановлених на піддонах на роликах з автономними приводами.

***Підігрівник брухту системи VERTICON***

Фірма SMS (Німеччина) розробила конструкцію підігрівника брухту VERTICON, що використовує теплоту технологічного газу дугових сталеплавильних печей для нагріву брухту перед його завантаженням в піч. Верхню частину підігрівника з'єднано з патрубком газовідводу печі. Технологічний газ, проходячи зверху долілиць через три камери підігрівника, заповнені ломом, віддає теплоту брухту. У верхній камері згоряють горючі матеріали, присутні в металошихті. Кожна камера містить біля однієї третини завантаження печі. В періоди завантаження нагрітого брухту, з нижньої камери в піч через завантажувальне вікно на залишок розплаву від попередньої плавки, коли піч відключена від електроживлення, підігрів брухту здійснюється за допомогою пальників. В періоди випуску плавки і нахилу печі завантажувальне устаткування виводиться з об'єму печі. Плавку сталі проводять під спіненим шлаком, що забезпечується шляхом вдування в нього кисню і вугілля за допомогою стінової фурми.

Брухт нагрівається до температури 800оС. Піч місткістю 120 т обладнано підігрівником брухту місткістю 200 т і продуктивністю 200 т/г. Нижче наведено основні характеристики роботи ДСП у парі з підігрівником системи VERTICON:

|  |  |
| --- | --- |
| Кількість нагрівів у добу | - 40 |
| Час нагріву, хв | - 36 |
| Завантаження підігрітого брухту, т | - 130 |
| Болото рідкого металу в печі, т | - 40 |
| Потужність трансформатора, МВ⋅А | - 65 |
| Час плавлення, хв | - 24 |
| Час нагріву рідкого металу, хв | - 4 |
| Час печі під струмом, хв | - 28 |
| Загальна тривалість плавки, хв | - 36 |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | - 245 |
| Витрата електродів, кг/т | - 1-1,5 |
| Витрата вуглецю, кг/т | - 10-15 |
| Витрата вапна, кг/т | - 30 |
| Витрата кисню, нм3/т | - 30-40 |
| Витрата природного газу, нм3/т | - 10 |

При використанні підігрівника брухту системи VERTICON підвищується вихід придатного металу, усуваються поломки електродів, процес плавлення протікає спокійно. Тому що завантаження брухту проводиться без одвороту склепіння, витрата електроенергії знижується на 20-40 кВт⋅г/т. При цьому тривалість плавки в 120-т печі знижується до 36 хв, що забезпечує продуктивність печі 200 т/г.

***ДСП з шахтним підігрівом брухту***

Конструктивно в цей час існує 3 різновиди печей з шахтним підігрівом брухту:

* ДСП з простим шахтним підігрівником;
* Двохкорпусні ДСП з простим шахтним підігрівником;
* ДСП з шахтним підігрівником з утримуючими пальцями.

*ДСП з простим шахтним підігрівником* представляє собою сучасну дугову сталеплавильну піч, на якій зверху на склепіння замість газовідвідного патрубка встановлено металеву шахту. Після випуску попередньої плавки на залишене болото металу через шахту завантажується металобрухт в повному об'ємі, необхідному для однієї плавки. Після включення електродів утворені гази піднімаються по шахтному підігрівнику, віддаючи тепло шихті, що перебуває в ній, і попередньо її підігріваючи. В міру проплавлення металошихта поступово опускається у ванну печі, розплавляючись за рахунок тепла металу, шлаку і електричних дуг. Зараз працює кілька печей в Англії, США, Туреччині і Китаї місткістю 90-95 т з трансформатором потужністю 65-80 МВ⋅А і кисневими фурмами із загальною витратою кисню 1500 нм3/г. Піч місткістю 90 т має діаметр кожуха 6,1 м, шахту об'ємом 67 м3, графітовані електроди діаметром 560 мм і працює при максимальній напрузі 820 В.

*Двохкорпусна піч з шахтним підігрівом.* Ідея створення двохкорпусних печей з шахтним підігрівом взята з реалізованих проектів успішно працюючих двохкорпусних надпотужних ДСП. Двохкорпусні шахтні печі дозволяють реалізовувати безперервне використання тепла відхідних газів в усі періоди плавки. Двохкорпусний агрегат має одну систему трансформатор – електродотримач – електроди, які обслуговують роботу двох сталеплавильних ванн. Коли в першій ванні йде плавлення і рафінування з використанням дугового нагріву в сусідній ванні ведеться підігрів металобрухту в шахті за рахунок паливно-кисневих пальників і відхідних газів з першої печі. Тому плавка в другій ванні починається вже на гарячій шихті, що значно стабілізує процес горіння дуг і дозволяє використовувати введену потужність на 92%. Порівняння показників роботи одно- і двохкорпусних ДСП з шахтним підігрівником (табл. 13.27) показало, що двохкорпусні печі забезпечують зменшення тривалості циклу плавки на 25-30%, підвищення продуктивності на 25-30%, зниження витрати електродів на 10-15%.

**Таблиця 3.53.** Порівняльні показники роботи одно- (ОШ) і двохкорпусних (ДШ) ДСП місткістю 90 т з шахтним підігрівником брухту

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Показники | ОШ | ДШ |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 330 | 340-360 |
| Витрата електродів, кг/т | 1,8 | 1,6 |
| Витрата кисню, нм3/т | 30 | 25-30 |
| Витрата газу, нм3/т | 7 | 6-8 |
| Вуглець завалки, кг/т | 15 | 8-10 |
| Вуглець дуття, кг/т | 5 | 3-8 |
| Час під струмом, хв | 33-40 | 35-37 |
| Загальна тривалість циклу плавки, хв | 51-60 | 38-43 |
| Продуктивність, т/г | 96-112 | 130-153 |
| Річна продуктивність, тис. т/рік | 700-800 | 1030-1100 |

Використання комплексу з двох ДСП з шахтним підігрівником з єдиною системою електроживлення печей спричиняє підвищені капітальні вкладення на вихідному етапі. Однак, вони будуть окуплені протягом більш короткого часу в порівнянні з будівництвом двох однокорпусних печей. В останні роки введено в лад двохкорпусні печі місткістю 90, 95, 140 і 165 т у Франції, Люксембурзі, Бельгії та США.

*Шахтні печі з утримуючими пальцями.* Подальший розвиток ідея шахтного підігріву отримала в створенні ДСП з шахтним підігрівом з утримуючими пальцями. Ідея полягає в тому, що шахта постійно заповнена металобрухтом, що опускається в міру необхідності завантаження печі. Таким чином, використовується тепло відхідних з ДСП газів на всіх режимах роботи ДСП. Поступова завалка печі з підвалкою забезпечує швидке плавлення скрапу. Цикл плавки полягає в завалці першого завантаження відразу після підготовки печі і її розплавлення в ДСП. Одночасно шахта заповнюється металобрухтом, що підігрівається відхідними газами. Після проплавлення другої завалки, шахта знову заповнюється скрапом, який підігрівається відхідними газами під час рафінування і підігріву сталі в ДСП.

ДСП з шахтним підігрівником брухту з утримуючими пальцями представляє собою надпотужну ДСП, в якій на місці патрубка відводу газу встановлюється металева шахта, з'єднана з системою відводу газу на газоочистку. На рівні склепіння печі встановлюються утримуючі пальці, які регулюють надходження металобрухту в ДСП. Утримуючі пальці виготовляються у вигляді порожніх коробок з корозійностійкої жаростійкої сталі і охолоджуються водою.

В цей час встановлено кілька таких печей, що працюють у режимі дуплекс процесу ДСП-АКОС. Шахтні підігрівники відрізняються за конструкцією. Відмінною рисою є перекриття верху шахти. На заводі Натстил шахта закривається пересувним куполом, а на заводі в Німеччині шахта перекривається заслінкою, охолоджуваною водою.

Енергозбереження при електроплавці пов'язано з новими конструктивними рішеннями на електропечі: донний випуск, струмоведучі рукави електродоутримувачів, збільшення площі водоохолоджуваних стін і т.п. В табл. 3.54 наведено показники працюючих печей такого типу, в тому числі і двохванних печей з однією електродною групою.

**Таблиця 3.54.** Порівняльні показники електродугових печей змінного (АС) і постійного (ДС) струму з шахтним підігрівником брухту

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показник | Франція | Люксембург | Бельгія |
| Тип печі | Двохванна, АС | Двохванна, АС | Однованна, шахта з пальцями, ДС |
| Шихта | 100% скрапу | 100% скрапу | 63-73 % скрапу 27-37% чавуну |
| Маса плавки, т | 90 | 90 | 140 |
| Потужність трансформатора, МВ⋅А | 90 | 105 | 110 |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 322 | 320 | 206-275 |
| Витрата електродів, кг/т | 1,6 | 1,6 | 1,0 |
| Витрата чавуну, кг/т | 7 | - | - |
| Витрата кисню, нм3/т | 30 | 27 | 25-30 |
| Витрата палива, кг/т | 5 | - | 6-8 |
| Витрата порошкоподібного вугілля, кг/т | 3 | 6,15 | 3 |
| Тривалість роботи, хв:  під струмом  без навантаження | 33  6 | 39  16 | 37-50  15-20 |

Необхідно відзначити, що печі з шахтними підігрівниками складні в експлуатації, потрібно спеціально підготовлений брухт, крім того, доводиться використовувати два види завантажувальних бадей.

Показники роботи 150-т звичайної дугової печі (ДСП), шахтної дугової печі (ШП) і шахтної дугової печі з утримуючими пальцями, обладнаною системою донного випуску наведено в табл. 3.55.

Витрати електроенергії в чистому виді при використанні шахтного підігріву знижуються з 400 до 300 кВт⋅г/т сталі, тобто з 60 до 51%. Необхідно при цьому врахувати і енергетичні витрати паливно-кисневими пальниками. Сумарні витрати знижуються з 68% до 63% (51+12). При цьому загальне використання внесеної енергії зростає з 57 до 67%, завдяки тому, що близько 100 кВт⋅г/т вертається у вигляді тепла переданого металобрухту відхідними газами у шахтному підігрівнику. Порівняльний технологічний і енергетичний аналіз показують, що застосування ДСП з шахтним підігрівником брухту дозволяє підвищити продуктивність плавильного агрегату на 25-30%, знизити енергетичні витрати, включаючи електроенергію і паливно-кисневі пальники, на 20-25%, підвищити загальне використання енергоресурсів на 10%. При цьому енергія відхідних газів використовується на 60%.

**Таблиця 3.55.** Показники роботи 150-т звичайної печі (ДСП), шахтної дугової печі (ШП) і шахтної дугової печі з утримуючими пальцями, обладнаною системою FAST (ШПФ)

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Показники роботи | ДСП | ШП | ШПФ |
| Температура сталі при випуску, оС | 1620 | 1620 | 1600 |
| Струмовий час плавки, хв | 38 | 26,5 | 25,8 |
| Безструмовий час плавки, хв | 12 | 11 | 8,0 |
| Тривалість плавки, хв | 50 | 37 | 33,5 |
| Продуктивність печі, т/г | 180,5 | 239,8 | 267,9 |
| Кількість плавок у добу | 28,8 | 38,4 | 42,9 |
| Виділення СО2, кг/т | 667 | 440 | 430 |
| Витрати, дол./т | 18,79 | 14,05 | 11,52 |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 384 | 270 | 264 |
| Витрата електродів, кг/т | 1,6 | 1,1 | 1,0 |
| Витрата кисню, нм3/т:   * фурми * пальника | 30  5,4 | 28  9,8 | 28  9,6 |
| Витрата газу (пальника), нм3/т | 2,4 | 4,4 | 4,4 |
| Витрата вугілля в завалку, кг/т | 12 | 12 | 12 |
| Витрата інжектованого вугілля, кг/т | 7,3 | 4,1 | 3,8 |
| Витрата вапна, кг/т | 42 | 42 | 42 |

Розроблено конструкції печей, в яких шахта складається з двох розташованих одна над другою камер, розділених утримуючими пальцями, а також ДСП, в якій брухт підігрівають у шахтному і роторному підігрівниках.

Однак шахтні печі складні в експлуатації і мають ряд специфічних особливостей: більші габаритні розміри, можлива зварюваність окремих шматків шихти в процесі підігріву, більша висота падіння шихти при завалці підігрітого брухту на подину, наявність водоохолоджуваних пальців у шахті, значно більші інвестиції в порівнянні зі звичайними печами. Тому при виборі конструкції печі необхідно керуватися економічними і технологічними задачами проекту реконструкції або будівництва нових печей.

**Двохкорпусна ДСП**

Двохкорпусна ДСП представляє собою плавильний агрегат, який складається з двох корпусів (А і В). В одному (А) проводять нагрів брухту за допомогою пальників, в іншому (В) розплавляють нагрітий брухт електричними дугами.

Одночасно на спеціальному стенді проводять попередній нагрів брухту в завантажувальній корзині за рахунок тепла відхідних газів від обох печей. Після випуску плавки з другої печі (В), в неї завантажують з корзини попередньо нагрітий брухт і продовжують його додатковий нагрів за допомогою пальників. В печі А починають розплавлення брухту електричними дугами.

При роботі печі на 100% брухту питома витрата електроенергії знижується на 40% при підвищенні температури нагріву брухту з 20 до 800оС, витрата електродів становить 0,6 і час плавлення 0,43 від аналогічних параметрів, що характеризують плавку сталі у звичайних печах. Однак, якщо зрівняти роботу звичайної ДСП і двохкорпусної без обліку інших відмінностей, то така організація процесу дозволяє знизити витрату електроенергії на 5% підвищити продуктивність пічної двохкорпусної установки практично в 1,5 рази (табл. 3.56).

**Таблиця 3.56.** Порівняльні показники роботи одно- і двохкорпусної ДСП

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Показник | Однокорпусна піч | Двохкорпусна піч |
| Встановлена потужність трансформатора, МВ⋅А | 60 | 60 |
| Продуктивність, т/рік | 660000 | 950000 |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 420 | 400 |
| Економія витрат електроенергії:   * питома (кВт⋅г/т) * річна (кВт⋅г) | -  - | 20  19000000 |

**Низькоенергетична електрична дугова піч фірми BSE (LEAF - BSE)**

Це запатентована фірмою BSE (Badiche Stahl-Engineer GmbН) розробка ДСП.

Основа печі – кожух, футеровка, еркерний випуск, механізм нахилу порівнянні з печами постійного або змінного струму звичайної конструкції. Піч відрізняється верхньою частиною кожуха. На нижню футеровану частина кожуха встановлено вгорі додатковий кожух для збільшення об'єму, заповнюваного металобрухтом. Це дозволяє забезпечити завантаження всього металобрухту за один прийом або здійснювати його підвалку в процесі плавки без відключення струму через верх печі. Електроди розташовано таким чином, що плавлення шихти відбувається поблизу подини. Металобрухт постійно підігрівається у верхній частині печі. Нагрів може бути інтенсифіковано за рахунок організації доопалювання відхідних газів у верхніх горизонтах печі. Температура нагрітого металобрухту при цьому досягає 1000оС. Перевага зазначеної конструкції складається в концентрації тепла при плавленні брухту і концентрованому його підігріві, у високій ефективності теплопередачі і простоті конструкції печі. Розроблювачі прогнозують наступні виробничі показники для ДСП місткістю 150 т: продуктивність – 200 т/г, тривалість плавки – 45 хвилин; питома витрата електроенергії – 270 кВт⋅г/т, споживання кисню – 35 нм3/т; споживання газу – 7 нм3/т; витрата електродів на печах змінного струму – 1,2 кг/т, постійного – 0,8 кг/т.

**ДСП з безперервним завантаженням і підігрівом металобрухту**

Жорсткість законодавства з охорони навколишнього середовища, постійний ріст роздрібних цін на електроенергію, а також посилення конкуренції на світовому ринку сталі зажадали створення нових безперервних сталеплавильних агрегатів, установок, що сполучать в собі переваги електропечей і конвертерних пристроїв. Однією з таких розробок є процес Сonsteel. Сутність розробленого і впровадженого в середині 80-х років ХХ століття в США процесу складається в об'єднанні електропечі з агрегатами попереднього підігріву фрагментованого брухту, шлакоутворювальних і піноутворювальних матеріалів, безперервному сході спінених шлаків через поріг печі і періодичному випуску металу. Вихідна установка розрахована на продуктивність сталі 300 тис.т/рік, періодичність випуску 45-55 хвилин протягом циклу 27 г. Після чого проводиться обслуговування футеровки і устаткування печі. Витрата електроенергії становить 435 кВт⋅г/т.

За технологією Consteel брухт разом зі шлакоутворювальними добавками безупинно подають у ДСП по конвеєру через прохідну піч попереднього нагріву шихти. В печі, завдяки спеціальному температурному і шлаковому режиму, одночасно протікають процеси плавлення і вуглецевого кипіння. Попередній підігрів шихти до 800оС в прохідній печі за рахунок доопалювання СО, що вміщується у відхідних з ДСП газах, і спалювання палива навіть при ККД рівному 30%, обходиться вдвічі дешевше, ніж у ДСП за рахунок електроенергії. Фактично при об’ємній масі брухту 714 кг/м3 і його раціональному укладанню на конвеєрі ККД становить 45-50% залежно від вмісту СО у відхідних газах. Концентрація газу СО у відхідних газах після прохідної печі ~ 0,01% і може бути зменшена до 0,001%. Плавку в ДСП ведуть при збереженні «болота», підтримуючи температуру металу на рівні 1550-1590оС, необхідну для кипіння. Розплавлення 35 т брухту і нагрів сталі до температури більше 1540оС відбувається за 35 хв, а при відповідній його якості за 27 хв з необхідним ступенем вирівнювання температури і складу ванни по всьому об'ємі. Вихід шлаків 80 кг/т сталі. Спінювання забезпечує висоту шару шлаку ~ 160 мм, при цьому ванна засвоює близько 80% енергії, що виділяється в дугах, а при товщині 75 мм, засвоєння енергії становить лише 30%.

Через високий рівень пінистих шлаків водоохолоджувальні панелі закривають стіни на 600 мм зверху, нижче зроблена вогнетривка футеровка. Продувка ванни киснем дозволяє заощаджувати 5 кВт⋅г/нм3 О2. Загальна витрата енергії 420 кВт⋅г/т рідкої сталі і при спалюванні додаткового палива в прохідній печі для підігріву шихти 390 кВт⋅г/т. Цей показник можна поліпшити за рахунок подовження прохідної печі. Весь процес контролюється ЕОМ.

Показники роботи печі Consteel у порівнянні з показниками звичайної печі наведено в табл.3.57. Плавка під спіненими шлаками в такій печі дозволила знизити вміст азоту в сталі на 0,0015%. Вміст FeО у шлаку зменшився з 30-35 до 15-25%, що сприяло зниженню окисленості сталі і меншому зношенню футеровки печі. Основою ефективної роботи системи завантаження брухту є його ретельна підготовка. Шматки брухту не повинні перевищувати по довжині 1 м; щільність брухту повинна бути невеликою, щоб не затягався процес його плавлення – розчинення в рідкій ванні. Рівень шумовиділення при роботі печі становить 75-85 дб, що на 20-25 дб нижче, ніж на старій печі. Перевагами печі є також зниження викидів пилу на 40% за рахунок фільтруючого ефекту брухту, що нагрівається, і газощільності печі, повне доопалювання моноокису вуглецю і значне зниження витрат виробництва.

У цей час в світі працюють до десяти печей різного апаратурного оформлення. Установка конструкції Techint Technologies (рис. 13.49) передбачає доопалювання відхідних з ДСП газів у камері доопалювання, розташованої на початку тунельного підігрівника брухту з подальшою утилізацією тепла газів у регенераторі для підігріву води або повітря.

**Таблиця 3.57.** Показники роботи печі Consteel (А)

і звичайної дугової печі (Б)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Показник | А | Б |
| Маса плавки, що випускається, т | 72 | 72 |
| Питома витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 354 | 510 |
| Питома витрата енергії, кВт⋅г/т | 548 | 675 |
| Електрична потужність, МВт | 34 | 36 |
| Витрата кисню, нм3/т | 34 | 22 |
| Витрата вугілля, кг/т | 20 | 6 |
| Витрата природного газу, нм3/т | 0 | 3 |
| Тривалість плавки під струмом, хв | 45 | 61 |
| Тривалість плавки, хв | 53 | 80 |
| Витрата електродів, кг/т | 1,5 | 2,6 |
| Продуктивність, т/добу | 1900 | 1300 |

Фірма Danieli удосконалила конструктивне оформлення процесу Consteel, установивши додатково так званий «плавильний робот». Використовується тунельний підігрівник брухту, забезпечується безперервна подача його в піч, випуск сталі ведеться в ківш, встановлений на поворотному столі. Використання поворотного стола дозволяє до мінімуму знизити час транспортування ковша до установки ківш-піч, забезпечує операцію скачування шлаків і передачу ковша зі сталлю на МЛНЗ, що дозволяє знизити температуру металу на випуску з ДСП на 15-20оС, знизити витрату електроенергії на 20-30 кВт⋅г/т і скоротити тривалість плавки на 1-2 хвилини.

**Двохкорпусний агрегат «Сonarc»**

Ріст вмісту домішок кольорових металів у сталевому брухті і необхідність одержання «чистої» сталі змушують електросталеплавильників використовувати в шихті дугових печей первородні матеріали і, зокрема, металізовані окатиші та рідкий чавун. У цих умовах необхідна дугова піч, здатна працювати на шихті з більшим вмістом у ній первородних матеріалів. Таким агрегатом служить двохкорпусна піч «Conarc» (combined: CONverter + electric ARC furnace), що є комбінацією дугової печі і конвертера.

Агрегат «Conarc» має один трансформатор, один комплект електродів і один комплект кисневих фурм на два корпуси. Кожний з корпусів обладнано одним маніпулятором і системами вдування вугілля і кисню та донного перемішування сталевої ванни. Такий агрегат може працювати на шихті, що включає в різному сполученні рідкий і твердий чавун, брухт, металізовані окатиші в гарячебрикетоване залізо.

Впроваджена в експлуатацію трифазна піч Conarc конструкції Mannesmann Demag Metallurgy місткістю кожного з корпусів по 170 т з трансформатором потужністю 115 МВ⋅А. Кожний з корпусів печі працює спочатку в режимі конвертера, а потім у режимі дугової печі. У режимі конвертера на залишок рідкої розкисленої сталі від попередньої плавки (30 т) через жолоб у робочому вікні заливають рідкий чавун (65-140 т), на поріг вікна насипають доломіт, закривають вікно і починають продувку при витраті кисню до 180 нм3/хв, що регулюється автоматично. По ходу продувки завантажують вапно для підтримки основності шлаку на рівні три і безупинно через отвір у склепінні завантажують металізовані окатиші. Після окислення кремнію, марганцю, дефосфорації розплаву і зниження вмісту вуглецю в ньому до 1% продувку припиняють, піднімають та відводять кисневу фурму і на корпус повертають електроди.

Починається період роботи в режимі дугової печі. У перші дві хвилини при невеликій електричній потужності розплавляють тверді шлакоутворювальні матеріали, а потім включають дуги на повну потужність і одночасно починають вдувати кисень через дверну фурму і безупинно через отвір у склепінні завантажують металізовані окатиші зі швидкістю протягом першої-другої хвилин 1000 кг/хв, а потім – 3000 кг/хв. Наприкінці режиму дугової печі швидкість завантаження металізованих окатишів знижують, щоб удержати шлак в спіненому стані і нагріти сталь до необхідної температури. Перед випуском вимірюють температуру сталі і активність кисню в ній. Електроди піднімають і переміщають на другий корпус. Для одержання спінених шлаків по ходу плавки під рівень шлаків вдувають вуглець і кисень через дві стінові фурми і фурму маніпулятора. Витрата вуглецю на кожну фурму регулюється автоматично. Сталь на випуску містить 0,03-0,042% С; 0, 006-0,014% Р; 0,002-0,0013% S; 0,02-0,04% Cu; 0, 015-0,02% Cr; 0,004-0,015% Ni; 0,005-0,008% N при температурі 1620-1660оС. Сумарна витрата кисню становить 20-55 нм3/т сталі.

Якість виплавленої сталі – на рівні конвертерної, що дозволяє розливати сталь на тонкослябовій МНЛЗ. Продуктивність печі при долі чавуну в шихті від 5 до 70% становить від 125 до 230 т/г. При подальшому збільшенні частки чавуну вона знижується.

**Комбінований сталеплавильний агрегат**

Австрійська фірма Voest-Alpine Industriealna-genbau Gmbн запатентувала конструкцію комбінованого агрегату і спосіб виплавки сталі в ньому, що представляє об'єднані єдиним робочим простором дугову сталеплавильну піч постійного або змінного струму і конвертер (рафінувальну ємкість).

Дугова піч може бути обладнана шахтою для підігріву брухту технологічним газом, розташованою або збоку, або по центру печі. В останньому випадку чотири нахилених до центра електрода – катода вводяться через отвори по периферії склепіння. Шахта оснащена водоохолоджуваними утримуючими брухт пальцями. Як шихту можна використовувати брухт, рідкий чавун і металізовану сировину. Чавун заливають за допомогою жолоба через робоче вікно дугової печі. Металізовані окатиші або гарячебрикетоване залізо завантажують за допомогою конвеєра через отвори у склепіннях дугової печі і конвертера. Метал, який наплавляється у дуговій печі, переливається самопливом через поріг у ванну конвертера або рафінувальної ємкості, де проводиться його продувка киснем за допомогою однієї або декількох фурм. Ванна дугової печі має поперечний переріз круглої форми. Рафінувальна ємкість може мати круглий, овальний або прямокутний поперечний переріз, вона може бути обладнана декількома фурмами різного призначення. Метал випускають через отвір у днищі конвертера.

**Дугова сталеплавильна піч типу «К-ES»**

Піч має два корпуси, один з яких один тиждень перебуває в роботі, а другий – у ремонті. Потім другий корпус працює протягом тижня, а перший – ремонтується. Піч обладнана трансформатором потужністю 50 МВ⋅А. Основними елементами системи «К-ES» є: заглибна стінова фурма для вдування вуглецю; шість фурм-пальників для доопалювання технологічного газу (три тангенціальних і три радіальних) потужністю по 0,5-4,5 МВт; три подові кисневі фурми (витрата кисню – 6 нм3/хв на фурму); одна киснева фурма, що витрачається; система аналізу технологічного газу, який може контролювати або вміст СО у печі, або вміст О2 на виході з печі.

Витрата вугілля, яке видувається, становить 5-25 кг/хв залежно від періоду плавки. Присадку кускового вугілля не проводять. Інтенсивність кисневої продувки ванни регулюється по оптимальному ступеню доопалювання технологічного газу, що досягається при вмісті 5-10% СО і менш 3% О2 у відхідному газі. Система «К-ES» дозволяє швидко змінювати швидкість розплавлення шихти і тривалість плавки залежно від роботи ковша-печі, сортових МНЛЗ. Управління роботою всіх енергетичних елементів печі (трансформатор, пальники, фурми) здійснюється автоматично. Тому що корпуса печі працюють поперемінно, торкретування футеровки не проводять і через два тижні міняють фурму для вдування вугілля. Порівняння результатів роботи печей – звичайної і «К-ES» показує переваги останньої:

Витрата електроенергії\* -49 кВт∙г/т

Витрата кисню +9 нм3/т

Витрата електродів -0,4 кг/т

Витрата природного газу +1,4 нм3/т

Витрата матеріалів:

кускового вугілля -3 кг/т

вугільного порошку +1 кг/т

вугілля на навуглецювання сталі -1,2 кг/т

Вихід придатного +2,3%

Продуктивність +10%

Струмовий час плавки -7 хв

*\* - економія; +перевитрата*

**Інші електросталеплавильні агрегати**

У сталеплавильному виробництві набувають застосування сталеплавильні агрегати EOF (енергетично оптимізовані печі), що працюють на шихті з брухту і чавуну з можливістю доведення частки брухту до 100%. Два таких агрегати працюють у Бразилії, намічене будівництво 40-т агрегату в США. Дугові електросталеплавильні печі перетворюються в стабільно і швидко працюючі плавильні агрегати.

Розробляються надпотужні електропечі з ексцентриковим донним випуском, з прискореним нахилом, зменшеним кутом повороту і укороченою короткою мережею; дугові печі овального типу з донним випуском і центральним розташуванням електродів. Практично у всіх великотоннажних електропечах пропонується вдувати суміш вугільного пилу з киснем за допомогою вугільно-кисневих пальників, що на 100% збільшує швидкість плавлення брухту і значно знижує витрату електроенергії.

Використання рідкого чавуну при плавці сталі в дугових печах збільшує продуктивність печі на 20%, знижує витрату електроенергії на 70 кВт⋅г/т (до 310 кВт⋅г/т) і електродів на 0,3 кг/т (до 1 кг/т). Економічна ефективність визначається співвідношенням цін на рідкий чавун і брухт, наявністю рідкого чавуну.

**Електропіч типу ОКБ-1320 для виплавки синтетичних шлаків**

Електропіч ОКБ-1320 призначено для виплавки високоглиноземистих синтетичних шлаків, застосовуваних для обробки рідкої сталі в ковші з метою одержання сталей високої якості.

Піч може бути використана для одержання синтетичних шлаків двома способами: у першому випадку переплавляють високоглиноземистий продукт або корунд, отриманий у спеціальній печі, з вапном; у другому – синтетичні шлаки виплавляють без попереднього одержання напівпродукту, для чого спочатку завантажують боксит і відновлюють вуглецем залізо, кремній, а потім додають вапно, одержуючи паралельно залізокремністий продукт. Технологічні характеристики печі наведено нижче:

|  |  |
| --- | --- |
| Потужність трансформатора, кВ⋅А...……………………... | 3х5500 = 16500 |
| Діапазон вторинної напруги трансформаторів, В……….. | 255 – 162,5 |
| Число фаз…………………………………………………… | 3 |
| Частота, Гц………………………………………………..... | 50 |
| Максимальний струм електрода, А...…………………….. | 48000 |
| Діаметр графітованого електрода, мм……………............. | 550 |
| Діаметр розпаду електрода, мм………………………....... | 1750 |
| Число електродів, шт………………………………………. | 3 |
| Хід електродів, мм…………………………………………. | 1500 |
| Максимальна швидкість електродів, м/хв………………... | 2,6 |
| Діаметр кожуха, мм………………………………………... | 7000 |
| Розміри плавильного простору, мм: |  |
| діаметр……………………………………………... | 6000 |
| висота………………………………………………. | 3110 |
| Число льоток, шт.: |  |
| для випуску шлаку………………………………… | 1 |
| для випуску сплаву………………………………... | 1 |
| Кількість робочих вікон, шт………………………………. | 1 |
| Розрахункова продуктивність печі, т/г…………………… | 5 |
| Розрахункова витрата охолоджуваної води, м3/г………... | 660 |
| Маса печі, т…………………………………………………. | 507 |

Електропіч ОКБ-1320 трифазна, кругла стаціонарна. Кожух зварений з плоскою підставою, встановлюється на спеціальній рамі, закріпленій на фундаменті.

Футеровка ванни вугільна. Шлак виплавляється на гарнісажі, для чого на укоси ванни встановлюються плитові мідні холодильники. Піч завантажується напільною завантажувальною машиною через робоче вікно, розташоване по осі з шлаковою льоткою. Механізм відкривання заслінки робочого вікна електромеханічний. Шлаки і попутний метал випускаються через відповідні льотки. Льотка для зливу шлаку відкривається і закривається пробкою дистаційним пневмоциліндром з системою важелів. Льотка для зливу металу зашпаровується вогнетривкою масою. Оброблення отвору проводиться пневмобуром. Над робочим вікном печі є витяжний зонт евакуації газів, що виділяються через робоче вікно. Хромомагнезитове склепіння печі лежить вільно на кожусі. Склепінне кільце – зварене, водоохолоджуване. Над склепінним кільцем встановлюється площадка для обслуговування електродів. На склепінні печі встановлено керамічні економайзери. Система переміщення електродів розміщається в шахті, встановленої на загальній з піччю рамі. Переміщення електрода рейкове від електродвигуна через двоступінчастий черв'ячний редуктор. Маса переміщуваних електродів частково врівноважується противагами. Механізм затиску електрода пружинно-пневматичний. Струмопідвід здійснюється кабелями і водоохолоджуваними трубами.

Система водоохолодження печі складається з двох груп, що обслуговуються самостійно: - водоохолодження холодильників і шлакової льотки; - водоохолодження склепінного кільця, електродотримача, кабелю і дверцят робочого вікна.

У системі водоохолодження холодильників і шлакової льотки передбачаються датчики, які забезпечують сигналізацію і відключення печі у випадку неприпустимого перевищення температури і зниження тиску води. Регулювання потужності печі автоматичне.

**Вибір потужності мережних трансформаторів для живлення дугових електросталеплавильних печей**

Найбільшого значення електричне навантаження ДСП досягає в період розплавлення твердої завалки. У цей період піч працює з досить низьким коефіцієнтом потужності (cosϕ), величина якого вибирається з умови введення максимальної активної потужності в садку при мінімально можливому тепловому впливі променистої енергії дуги на футеровку бічних стін і склепіння печі. У період розплавлення залежно від місткості і конструкції печі, а також складу і температури твердої завалки, величина cosϕ може перебувати в межах 0,65-0,8.

Розрахуємо максимальну потужність мережного трансформатора для печі місткістю 100 т, якщо задано:

Sпт = 50 МВА; Кз = 1,3; Sкзе = 85 МВА

де: - Кз – коефіцієнт завантаження трансформатора;

- Sкзе – потужність короткого замикання на електродах найбільш потужної ДСП з ряду обслуговування печей одним трансформатором.

Smax = Кз⋅Sпт  (3.4)

де: - Smax – значення максимального поштовхового навантаження одиночної ДСП;

- Кф – коефіцієнт форми графіка навантаження ДСП визначається на графічній залежності.

Для нашого випадку визначаємо Кф = 1,07, соsϕ = 0,7 і sinϕ = 0,7.

Тоді Smax = 1,3⋅50∙ = 73,8 МВ⋅А

Приймаємо мережний трансформатор потужністю 100 МВ⋅А, при цьому виконується умова:

Sст = 100 МВ⋅А > Sкзе = 85 МВ⋅А

Якщо в цеху є кілька печей, тоді необхідно враховувати вплив всіх печей на значення максимального струмового навантаження.

Значення сумарного максимального навантаження груп з «n» однакових печей, підключених до загального мережного трансформатора, визначається по формулі:

.

Нехай задано 3 печі місткістю 100 т (n = 3) і Sпт = 50 МВ⋅А.

Тоді Кз = 1,2; Sкзе = 85 МВ⋅А; n = 3

По рис. 13.55 і 13.56: Кф = 1,07; cosϕ = 0,7; sinϕ = 0,7

По формулі (13.1) Smax = 73,8 МВ⋅А, тоді  = 135 МВ⋅А.

Приймаємо 2 мережних трансформатори по 160 МВ⋅А.

При виході з ладу одного трансформатора, другий забезпечує повністю виконання виробничої програми цеху. Якщо за умовами в після аварійний період можна знизити виробничу програму, то приймаємо 2 трансформатори по 100 МВ⋅А.

Розрахуємо потужність мережного трансформатора, якщо в цеху встановлено кілька печей різної місткості:

Задано: n = 2 (100 т); S = S = 50 МВ⋅А; К = К = 1,2; S = S = 85 МВ⋅А;

n = 2 (25 т); S = S = 12,5 МВ⋅А; К = К = 1,2; S = S = 32 МВ⋅А

Визначаємо:

По рис. 13.55 і 13.56 К = К = 1,07; К = К = 1,13.

cosϕ1 = соsϕ2 = 0,7 cosϕ3 = соsϕ4 = 0,75

sinϕ1 = sinϕ2 = 0,7 sinϕ3 = sinϕ4 = 0,66

Для печей різного типу:

 (3.5)

 

Рmaxi = 0,707КзSпт (3.6)

Qmaxi = Кз⋅Sпт⋅sinϕ(1 + 1,25)2 (3.7)

 – для однакових печей.

Якщо підключено до мережного трансформатора «спокійне» навантаження, крім ДСП, то

,

,

де Рmaxсп і Qmaxсп – 30-хвилинні максимуми активної і реактивної потужності.

Для 3-го случаю по формулі (3.7):

 = 42,4 МВ⋅Т,

 = 10,6 МВ⋅Т

по формулі (13.4):

 = 60,6 М вар,

 = 15,6 М вар.

.

До установки можуть бути прийняті два мережних трансформатори потужністю по 100 МВ⋅А з невеликим обмеженням виробничої програми в після аварійний період.

**ДУГОВІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІ ПЕЧІ**

**ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (ДСППС).**

Основний об'єм електросталі виплавляється в цей час у дугових печах змінного струму, які працюють з відносно низьким коефіцієнтом потужності, що є джерелом потужних перешкод у живильних енергосистемах, які викликають сильну загазованість навколишнього середовища і утворюють високий рівень шуму, що досягає 120 дб.

Альтернативним варіантом є розробка дугових печей постійного струм. Електричні, енергетичні, екологічні і економічні переваги дугових сталеплавильних печей постійного струму (ДСППС) обумовили швидкий ріст в 90-х р.р. ХХ століття їх кількості і одиничної потужності.

Відхід від традиційних, використовуваних у трифазних дугових сталеплавильних печах (ДСП), рішень, які у випадку ДСППС не є оптимальними, встає питання вибору раціональної конструкції печі серед їх великого різноманіття. Провідні печебудівні і металургійні організації накопичили практичний досвід в області раціонального конструювання і експлуатації печей різної місткості та технологічного призначення.

У цей час введено в дію кілька типів печей (табл. 3.58), одно- двох- трьох- і чотирьох електродних, які відрізняються конструкцією подового електрода, ванни печі, способом розміщення випрямлячів струму.

**Таблиця 3.58.** Характеристики дугових печей

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Місткість печі, т | 4 | 6 | 7 | 12 | 30 | 35 | 40 | | 50 |
| Потужність трансформатора, МВА | 1,2 | 3,5 | 4,5 | 9,0 | 22,0 | 18 | 18 | | 2х18 |
| Місткість печі, т | 55 | 70 | 75 | 85 | 85 | 98 | | 100 | |
| Потужність трансформатора, МВА | 18 | 16 | 45 | 60 | 83 | 2х35 | | 2х70 | |
| Місткість печі, т | 100 | 130 | 145 | 165 | 165 | 230 | | | |
| Потужність трансформатора, МВА | 100 | 2х52,5 | 120 | 2х80 | 2х90 | 2х67 | | | |

Печі працюють з болотом рідкого металу на подині, на довгих дугах, при наявності спінених шлаків. Тривалість циклу плавки коливається від 62 до 130 хв, витрата електродів – 1,0-3 кг/т, електроенергії – 380-500 кВт⋅г/т. Ресурс роботи подового електрода становить 600-2000 годин. Переваги, виявлені під час експлуатації дугових печей постійного струму наступні:

* висока економічність внаслідок меншої на 50-60% витрати і рівномірного зношення електродів;
* рівномірне теплове навантаження на футеровку подини і стін печі завдяки центральному розташуванню електрода;
* менш гучна робота печі під час плавлення (рівень шуму не перевищує 90 дб) і зниження рівня флікера на 50%;
* робота печі на більш високій напрузі і меншому струмі, тобто на довгих дугах, що знижує до 5% питомі витрати електроенергії;
* при використанні електродів максимального діаметра до 710 мм можна застосовувати трансформатор до 120 МВА, що забезпечує продуктивність печі до 800 тис.т/рік.

Більша стабільність горіння і низький градієнт напруги дуги постійного струму дозволяють збільшити її довжину до 1,0-1,5 м. Чим більше довжина дуги, тим вище продуктивність печі і менше експлуатаційні витрати. Робота на довгих дугах має першорядне значення при розплавленні шихти. Однак у період рафінування це може викликати ріст потоку тепла на стіни і склепіння печі, що приводить до збільшення теплових втрат і підвищеному зношенню футеровки.

**Одноелектродні ДСППС**

Найбільше поширення одержали одноелектродні ДСППС. У такій печі графітований електрод є катодом, а прилягаючий до подового електрода метал – анодом. Це дозволяє в порівнянні з трифазною ДСП значно зменшити витрату дорогих графітованих електродів (1,0-1,5 кг/т сталі) і поліпшити теплообмін довгої дуги з металом.

Застосування одного приводу переміщення електрода викликає значне (майже двохкратне) зниження капітальних витрат у порівнянні з трифазною ДСП. При зменшенні сумарної бічної поверхні електрода знижується його витрата в результаті зменшення втрат на окислення і сублімацію графіту. При розплавленні шихти утворюється велика лунка, в якій заглиблена довга дуга постійного струму. Обвали шихти, флуктуації дзеркала ванни і бризи металу не можуть істотно вплинути на стійкість дуги і витрату електрода. В періоди окислення і рафінування металу осьове розташування дуги забезпечує менше і рівномірне зношення футеровки. Застосування подового електрода викликає інтенсивне перемішування ванни металу. Стабільність дуги сприяє рівномірному зношенню електрода з утворенням лунки в центрі його торця і забезпечує часткове екранування склепіння від випромінювання. Горіння дуги в шарі пінистих шлаків поліпшує умови захисту футеровки.

У надпотужних печах магнітне поле струму короткої мережі викликає відхилення дуги вбік, протилежний джерелу живлення. Це приводить до локального перегріву футеровки стін печі. Розроблено кілька методів симетрування горіння дуги: горизонтальне зрушення катода вбік, протилежний відхиленню дуги; зсув подового електрода в напрямку, протилежному відхиленню дуги; біфілярне симетричне виконання короткої мережі; застосування неоднорідного електропровідного шару футеровки, розташованого на подовому електроді; стовщення нижньої частини кожуха печі або застосування додаткового магнітного екрана.

Обмеження електричної потужності дуги одноелектродних ДСППС (120 МВт) слідує з умов: максимально припустимого значення сили струму графітованого електрода (130 кА); припустимого значення сили струму стійкого горіння дуги (120 кА); припустимого значення напруги дуги в класі низьковольтних установок (1000 В).

Збільшення сили струму у великотоннажних одноелектродних ДСППС ускладнює завдання створення потужних випрямлячів і викликає підвищення втрат у джерелі живлення і струмопідводах. В результаті узагальнення даних експлуатації печей отримана залежність необхідної сили струму дуги (I) від місткості (Q) печі, кА:

*I* = 12,5 + 0,90Q.

Довжина дуги, заглибленої в шлак, досягає значення, м:

*l* = 0,08 D,

де D – діаметр ванни на рівні укосів печі.

З формули слідує, що обмеження потужності одиничної дуги приводить з певної межі до обмеження місткості великотоннажних одноелектродних ДСППС або при збільшенні місткості – до зменшення інтенсивності нагріву металу і, отже, до росту тривалості плавки. При цьому робота печі стає економічно менш ефективною.

Здебільшого ДСППС відрізняються конструкцією подового електрода, тому що подовий електрод є найбільш уразливим вузлом. Наприклад, дугова електросталеплавильна піч місткістю 60 т, переустаткована на піч постійного струму, з установкою тиристорного перетворювача струму на 45 кА має один центральний електрод. Нижня частина струмопідводу складається з круглої мідної плити, утвореної чотирма сегментами. Над мідною плитою перебуває провідна подина, яка складається з графітвмісних магнезитових вогнетривів. Температура подини контролюється постійно 12 термопарами. Плавка триває 2 години, температура металу на випуску 1700оС. Для підтримки надійного електричного контакту між шихтою і подиною в печі після випуску залишають 5-10 т розплаву. Наприкінці кожного тижня піч звільняється від розплаву, подина за допомогою кисневої трубки очищається і потім заправляється, наварюється шар товщиною 150 мм з високовуглецевої торкрет-маси.

Дугова одноелектродна сталеплавильна піч постійного струму з трансформатором граничної потужності, введена в експлуатацію на заводі в Німеччині, розрахована на річну продуктивність 660 тис. т сталі при роботі дуплекс-процесом з установкою ківш-піч, потужністю трансформатора 18 МВА. Місткість дугової печі (діаметр кожуха 6400 мм) – 145 т при масі випускної плавки 120 т. Піч обладнана графітизованим електродом-катодом діаметром 710 мм і пластинчастим подовим електродом-анодом. Потужність трансформатора – 120 МВА. Максимальна сила струму і вторинна напруга становлять відповідно 115 кА і 820 В. Стіни і склепіння печі обладнані водоохолоджуваними панелями. Піч оснащена стіновими і одним дверним газокисневими пальниками потужністю 5 МВт і фурмою для вдування кисню (до 4200 нм3/г) і вугілля (10-120 кг/хв).

Подовий електрод складається з 12 вертикально зварених концентрично розташованих пакетів, виконаних зі сталевого листа товщиною 1,7 мм. Анод розрахований на максимальну силу струму 115 кА, що відповідає щільності струму 1,0 А/мм2. Зазори між пластинками заповнені неелектропровідною масою, яка містить 77% MgО, 0,3% Al2O3, 3,8% Fe2O3, 18,0% CaО, 0,6% SiО2, з крупністю зерен – 0-5 мм. Охолодження анода не проводиться. При зміні анода після від'єднання плити анода відпрацьований анодний блок видавлюється домкратом і заміняється новим. Максимальний термін служби анода становить 2000 плавок при зношенні 0,25 мм на плавку. Теоретично анод може працювати до залишкової товщини подини 400 мм, що відповідає строку його служби 2800 плавок. Зношення подини контролюється за допомогою термопар. Сумарна витрата вогнетривів – 1,87 кг/т, у тому числі – 1,37 кг вогнетривкої маси, витрата електроенергії – 344 кВт⋅г/т, тривалість роботи печі під струмом за одну плавку – 40 хв, витрата природного газу і кисню відповідно – 6,9 і 35,9 нм3/т, графітованих електродів – 1,2 кг/т. Тривалість обробки сталі на установці ківш-піч 40 хв при витраті електроенергії 32 кВт⋅г/т.

**Багатоелектродні ДСППС**

При обмеженому струмовому навантаженні на електрод єдиним шляхом підвищення електричної потужності ДСППС є збільшення кількості електродів. Разом з тим паралельне горіння дуг в умовах односпрямованого плину струму викликає їх взаємне тяжіння, результатом чого є небажане зосередження області виділення тепла.

*Двохелектродні ДСППС.* Зіставлення роботи печей змінного струму, одноелектродних ДСППС і багатоелектродних показує, що:

* на одноелектродних ДСППС місткістю до 80 т питома витрата електродів може бути навіть вище чим на високоімпедансних печах змінного струму;
* на двохелектродних ДСППС витрата електродів на 40% менше, ніж на одноелектродних ДСППС;
* двохелектродна ДСППС є найбільш прийнятним електросталеплавильним агрегатом для надпотужної електропечі.

Основні технічні характеристики надпотужної двохелектродної дугової печі постійного струму наступні:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Діаметр корпуса на рівні подини, мм……………..... | | 7400 |
| Місткість, т...………………………………………..... | | 195 |
| Маса випускної плавки, т...………………………...... | | 135 |
| Маса залишку рідкої сталі, т...………………………. | | 60 |
| Потужність трансформатора, МВА…………………. | | 208 (4х52) |
| Сила струму після випрямлячів, кА………………… | | 188(4х47) |
| Максимальна активна потужність, МВт...………….. | | 110-135 |
| Система подових електродів…….... | 4 водоохолоджуваних електроди | |
| Діаметр графітованих електродів, мм………............. | | 700 |
| Максимальна потужність фурм, нм3/хв:   * для вдування кисню та вугілля...………… * кисневих...………………………………........... | | 210 (3х70)  60 (4х15) |
| Проектна продуктивність, т/г (шихта – 100% холодних металізованих окатишів)……………................ | | 147 |

Піч обладнана водоохолоджуваними стіновими панелями; склепіння також має водяне охолодження. На склепінні змонтований лоток для безперервного завантаження металізованих окатишів у зону відхилених до центра печі дуг. Поперечний переріз газовідвідного патрубка повинно забезпечити мінімальну швидкість технологічного газу і зменшення втрат з винесенням дріб'язку окатишів, що завантажуються. На печі встановлено три фурми для вдування вугілля і кисню – дві розташовано ближче до робочого вікна, третя – з боку позацентренного подового випускного отвору. Для спінювання шлаку на рівні шлакового поясу встановлено два інжектори вугілля. Доопалювання технологічного газу здійснюється за допомогою чотирьох кисневих фурм. Відбір проб і вимір температури металу і вмісту вуглецю в ньому проводять автоматично за допомогою маніпулятора.

Електричне живлення печі здійснюється через чотири трансформатори з тиристорними випрямлячами з 24-фазною пульсацією. Тому що живлення походить від двох незалежних джерел, надпотужна двохелектродна піч представляє дві одноелектродні печі постійного струму середньої потужності в одному корпусі. Така схема забезпечує різке зниження флікера.

Подовий електрод-анод виконаний водоохолоджуваним. Верхня сталева частина анода приварена до мідної частини трубчастого перетину, внутрішня поверхня якої має канали, що утворюють спіраль. Це забезпечує більшу швидкість води в мідній частині анода і високу теплопередачу. Ремонт і зміну подових електродів сполучають зі зміною футеровки в зоні шлакового пояса і зміною футеровки подини.

Технологія плавки сталі у двохелектродній печі постійного струму полягає в наступному. Після випуску плавки і закладення випускного отвору запалюють дуги і починають безупинно завантажувати на масу металу і шлаку, що залишилася від попередньої плавки, за допомогою лотка металізовані окатиші через отвір у склепінні. З першого моменту плавки включають всі фурми і інжектори. Відразу ж утворюється спінений шлак. За проектом тривалість плавки становить 55 хв, витрата електроенергії – 575 кВт⋅г/т.

*Двохелектродна ДСППС* *з овальною ванною* (рис. 14.6) обладнана системою завантаження брухту, яка складається з шахтного підігрівника брухту і завантажувального пристрою з двома штовхальниками, розташованими на різних рівнях. Брухт з бункера надходить у шахту і нагрівається під впливом технологічних газів до 800оС. Піч обладнана двома вертикальними графітованими електродами і двома подовими електродами, виконаними зі струмопровідних вогнетривів. Дуги відхиляються до центра печі, куди завантажується брухт, що зменшує теплове навантаження на стіни і дозволяє не застосовувати водоохолоджувані панелі. При використанні шахти необхідний об'єм плавильного простору печі відносно невеликий, а дуги – похилі і довгі.

*Трьохелектродна ДСППС,* пущена в експлуатацію у Франції, місткістю по рідкій сталі 85 т (маса плавки 75 т), висотою кожуха 2,8 м і діаметром – 5,8 м. Піч обладнана трьома графітованими електродами діаметром 500 мм, трьома подовими електродами, встановлена потужність трансформатора 83 МВА, напруга дуги 570 В, сила струму 40 кА, максимальна активна потужність 60 МВт. Продуктивність печі 1000 т/добу з доведенням її до 1500 т/добу. Витрата електроенергії склала 450-480 кВт⋅г/т, електродів 1, 8-2,9 кг/т сталі.

Вертикальне розташування електродів у багатоелектродній печі приводить до надмірної концентрації тепла в центральній зоні печі і до перегріву бічної поверхні електродів. Істотні недоліки цих печей, обумовлені підвищеним і нерівномірним зношенням футеровки печі, збільшеного опромінення бічної поверхні електродів, відсутністю інтенсивного перемішування металу викликали необхідність розробки принципово нових ДСППС.

*Чотирьохелектродна ДСППС.* Першим кроком в цьому напрямку стало створення дугової печі типу Comelt (рис. 14.7). Електроди в ній розташовані на напрямних і пропущені через периферійну частину склепіння під кутом 45о. Склепіння з'єднано з шахтою, де відбувається підігрів брухту відхідними газами. Дослідна 50-т піч має чотири графітованих електроди діаметром 250 мм і розщеплений подовий електрод. Дуги довжиною 0,5-1,2 м горять по осі електродів. Кожна пара електродів живеться від свого трансформатора потужністю 48 МВА. Максимальне значення струму становить 29 кА, напруга – 850 В.

За даними останніх публікацій уже розробляються шестиелектродні печі. В таких печах у будь-який період можна проводити плавку зі зменшеною кількістю електродів. Чим більше місткість багатоелектродної печі, тим більше можливих варіантів реалізації режиму симетричного горіння дуг. При різноманітному виконанні печей невикористані переміщувані системи можуть бути задіяні в роботі в сусідніх ваннах.

**Нові конструкції ДСППС**

***Двохкорпусна ДСППС***

Двохкорпусні ДСППС – один з напрямків розвитку конструкцій печей. Дотепер будуються тільки двохкорпусні печі з однією загальною електродною системою трифазного або постійного струму. У цьому випадку реалізується принцип дворазового зменшення кількості електродів. Розробка конструкції двохкорпусних печей пов'язана з необхідністю збільшення коефіцієнта використання джерела живлення і зниження, у зв'язку з цим, витрат на технологічну електроенергію, оплачувану по двоставочному тарифі. В той час як в одній з ванн печі йде розплавлення металошихти, в іншій – завантажується і підігрівається шихта.

Використання двохкорпусних печей дозволяє збільшити продуктивність при існуючій потужності трансформатора або зменшити потужність трансформатора при існуючій продуктивності.

Двохкорпусна піч в порівнянні з двома печами тієї ж місткості забезпечує: економію капітальних витрат мінімум на 35% (без обліку витрат на спорудження підстанції), скорочення тривалості плавки на 40%, зниження витрати електроенергії на 40-60 кВт⋅г/т і зменшення витрати електродів. В такій печі можна переробляти металобрухт низької якості (у порівнянні з шахтними печами) і більш ефективно використовувати тепло альтернативних джерел і відхідних газів для підігріву скрапу.

В процесі роботи двохкорпусної печі в будь-який момент часу дуговий нагрів можливий тільки в одній ванні. Це вимагає вибору відповідної технології плавки металу і використання альтернативних (неелектричних) джерел тепла.

Двохкорпусна піч з одним джерелом живлення може мати два комплекти струмопідводів і електродів, кожний з яких призначено для своєї ванни і за допомогою перемикача підключається поперемінно до загального джерела. Таке рішення дозволяє ще більше скоротити тривалість роботи печі без струму, значно збільшити відстань між ваннами.

Частка часу роботи печі *А*: 6% – зі зниженою потужністю на початку плавлення; 43% – з повною потужністю; 23% – зі зниженою потужністю; 7% і 3% – з відключеним струмом відповідно при завантаженні шихти і випуску плавки; 9% і 9/% – з відключеним струмом відповідно при витримці металу та з інших причин.

Частка часу роботи печі *Б*: 10% – зі зниженою потужністю на початку плавлення; 43% – з повною потужністю; 39% – зі зниженою потужністю; 4% і 4/% – з відключеним струмом відповідно при повороті електрода і з інших причин.

Найбільші можливості оптимального використання електроустаткування будуть відповідати комплексам, обладнаним печами з декількома ваннами, декількома пічними трансформаторами і випрямлячами. Порівняно легке управління дугою постійного струму, можливість передачі енергії постійного струму на відносно більші відстані, компонування багатоелектродних печей у багатованні комплекси забезпечують гнучке використання джерел електроживлення і оптимальні умови реалізації металургійних процесів при масовому виробництві електросталі.

***Двохшахтна ДСППС***

Застосування попереднього підігріву брухту відхідними газами є ефективним методом економії електроенергії і збільшення продуктивності електродугових печей, що працюють як на змінному, так і на постійному струмі. Двохшахтна ДСППС дозволяє об'єднати переваги попереднього підігріву брухту і використання постійного струму. При нагріванні металобрухту до 400оС економія електроенергії становить 50-60 кВт⋅г/т, до температури 600-800 і 1100-1300оС відповідно 60-75 і 100-120 кВт⋅г/т.

***Багатоенергетична ДСППС***

В цей час розроблені конструкції надпотужних дугових печей, обладнаних водоохолоджуваними панелями стін і склепіння, паливно-кисневими пальниками і фурмами для вдування кисню і вугілля. Сполучення трьох основних джерел тепла: електричної дуги, ентальпії шихти і палива – характерно для багатоенергетичної печі MEF (Multi-Energy-Furnace). Печі такої конструкції характеризуються зменшенням вартості виробництва сталі, зниженням необхідної потужності джерела живлення і зменшенням ступеня шкідливого впливу на живильну мережу.

Багатоенергетичні печі можуть мати різне виконання у вигляді однованних, двохванних, з нормальною або збільшеною висотою кожуха, що полегшує монтаж стінових пальників. Однак, такі рішення з використанням декількох джерел енергії особливо важливі для двохкорпусних печей.

Максимальний коефіцієнт використання введеної енергії мають ті печі, в яких електрична енергія є основним джерелом тепла. Низький коефіцієнт використання палива і значних витрат на очищення великої кількості генерованих у печах газів і пилу в значній мірі знижують ефект від використання цих додаткових джерел енергії. Тому застосування додаткового палива в ДСППС обґрунтовано тільки в тих випадках, коли ціна електроенергії в порівнянні з паливом дуже висока.

***Висококорпусна ДСППС***

Представником багатоенергетичних ДСППС є піч Danarc конструкції фірми ABS останнього покоління, введена в експлуатацію напередодні 2000 року. Одноелектродна ДСППС обладнана джерелом живлення постійного струму, яке складається з двох або чотирьох окремих блоків випрямлячів. Трансформатори і випрямлячі з'єднані в 12-імпульсні випрямні групи. Кожний блок випрямлячів має індивідуальне управління і оснащено реактором, який згладжує, підключеним послідовно, для зменшення миттєвих пікових значень сили струму при коротких замиканнях і для стабілізації дуги.

Система подових електродів включає чотири електроди стрижневого типу, вмонтованих у вогнетривку футеровку. Сталева верхня частина кожного електрода контактує з рідким металом, а мідна нижня частина забезпечує підведення електроживлення і охолодження.

Зона охолодження розміщена в товщі вогнетривкої футеровки подини з метою змістити нагору границі розділу твердої і рідкої фаз та обмежити в такий спосіб локальне теплове навантаження. Система керування джерелом живлення регулює одночасно положення верхнього електрода, напругу дуги і силу струму в чотирьох подових електродах.

Стенд для підігріву шихти складається з водохолоджуваної бадді, встановленої на візку для забезпечення швидкого і повністю автоматизованого завантаження скрапу, нагрітого до температури 600оС, у центральну зону печі. Гарячі гази, які відводяться з печі через рухливий водоохолоджуваний димохід, проникають у стовп скрапу зверху і передають йому тепло, остигаючи при цьому і залишаючи стенд для підігріву при температурі 400оС, тим самим запобігаючи надлишковим термічним навантаженням в утримуючих елементах бадді. Відповідно до вимог, які відносяться до технологічного процесу або обслуговування устаткування, гарячі гази можуть бути відведені в обхід бадді через спеціальний клапан і водоохолоджуваний трубопровід без порушення режиму роботи печі.

Одним з основних відмінностей у конструкції печі є підвищена місткість печі за рахунок застосування подовженого догори кожуха печі шляхом установки другого ряду водоохолоджуваних панелей. Це забезпечує роботу печі на одній завалці (без підвалки), краще використання переваг довгих дуг, більш повне доопалювання СО. Піч обладнана пальниками, розміщеними на двох рівнях по висоті, надзвуковими і киснево-вугільними фурмами, інжекторами для вдування вапна і вугілля, системою електромагнітного перемішування. Склепіння печі виконано у вигляді послідовно розташованих спіральних секторів з водоохолоджуваних труб. На печі передбачена камера доопалювання відхідних газів і автоматизована система управління електричним, газовим, шлаковим і температурним режимами.

Основні технічні характеристики печі наведено нижче:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Потужність трансформатора | 2х43,5 МВ⋅А | |
| Потужність електромагнітного перемішувача | 500 кВт | |
| Діаметр кожуха печі | 5800 мм | |
| Висота печі | 7380 мм | |
| Робочий об'єм | 157 м3 | |
| Діаметр електродів | 710 мм | |
| Хід: електрода | 8800 мм | |
| високочовникової бадді | 8000 мм | |
| Діаметр бадді | 5500 мм | |
| Робочий об'єм бадді | 110 м3 | |
| Потужність пальників: - верхнього рівня | 4 х 3,5 МВт | |
| - нижнього рівня | 8 х 3,5 МВт | |
| - кришки човникової бадді | 4 х 3,5 МВт | |
| - камери доопалювання | 3 х 7 МВт | |
| Надзвукова киснево-вугільна фурма: | | |
| Витрата кисню | 5000 нм3/т | |
| Витрата вугільного пилу | 15 кг/хв | |
| Інжекційне устаткування (для вапна і вугільного пилу):  кількість інжекторів для вапна  витрата вапна через один інжектор  кількість бічних інжекторів для вугілля  витрата вугільного пилу через один інжектор | 3  150 кг/хв  2  15 кг/хв | |
| Основні показники роботи ДСППС при роботі на одній завалці (без підвалки), але без підігріву шихти наведено нижче: | | |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | | 351 |
| Витрата кисню, нм3/т | | 32,2 |
| Витрата газу (СН4), нм3/т | | 6,8 |
| Інжекція вугільного пилу, кг/т | | 5,3 |
| Тривалість плавки під напругою, хв | | 43 |
| Загальна тривалість плавки (від випуску до випуску), хв | | 53 |
| Маса завантаження, т | | 98 |
| Маса сталі на випуску, т | | 90 |
| Продуктивність, т/г | | 102 |

Слід зазначити, що реалізація попереднього підігріву шихти в сполученні із завалкою брухту однією баддею можуть істотно поліпшити показники роботи печі. Даний висновок ґрунтується на порівняльних результатах роботи дугових сталеплавильних печей постійного і змінного струму, що працюють на попередньо підігрітій шихті (табл. 3.59).

**Таблиця 3.59.** Показники роботи дугової печі з підігрівом (А) і без підігріву (Б) шихти\*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Показник | А | Б |
| Витрата електроенергії, кВт⋅г/т | 260 | 330 |
| Витрата кисню, нм3/т | 35,0 | 41,6 |
| Витрата газу (СН4), нм3/т | 7 | 8 |
| Інжекція вугільного пилу, кг/т | 9,8 | 9,0 |
| Інжекція вапна, кг/т | 32,2 | 33,2 |
| Витрата електродів, кг/т | 0,9 | 1,1 |
| Тривалість роботи печі під напругою, хв | 30 | 36 |
| Загальна тривалість плавки (від випуску до випуску), хв | 39 | 42 |
| Маса завантаження, т | 100 | 100 |
| Маса сталі, яка випускається з печі, т | 90 | 90 |
| Продуктивність печі, т/г | 138 | 127 |

\**Дані отримані без трьох подових кисневих фурм*

**Порівняння технологічних і економічних показників роботи дугових печей різної конструкції**

Економічна ефективність процесу виробництва сталі в ДСП визначається, насамперед, продуктивністю. Щоб досягти звичайних показників продуктивності, властивих конвертерному виробництву, ДСП останнім часом модернізуються винятково для використання тільки розплавлення металобрухту і проведення окислювального періоду. Всі інші металургійні операції проводяться у позапічних агрегатах. Отже, головне завдання – це досягнення оптимальної ефективності використання енергії, шляхом застосування різних варіантів сучасних технологій з використанням кисню. Оскільки основні втрати енергії відбуваються з відхідними газами, тому головні зусилля повинні бути спрямовані на утилізацію цієї енергії для плавки вихідних матеріалів. Основними ціноутворюючими статтями при виплавці низьковуглецевих конструкційних сталей є енергія, видаткові матеріали, витрати на охорону навколишнього середовища, амортизація і заробітна плата.

Реалістична оцінка впроваджених і розроблених нових технологій і устаткування показує, що в майбутньому, можливо, заощадити до 17% витрат. Половина потенційної економії – 8,5% може бути досягнута шляхом зниження енергетичних втрат і до 4% – за рахунок скорочення видаткових матеріалів (електроди, ремонт і обслуговування устаткування). Таким чином, більша частина потенційної економії приходиться на енергетичні ресурси і може бути реалізована за рахунок зниження їх втрат. Чим вище споживання енергії, тим вище можуть бути втрати, основна частка яких, як було відзначено раніше, приходиться на відхідні гази. Отже, деякі процеси, розроблені в останні роки, по використанню енергії відхідних газів для попереднього підігріву брухту багато в чому сприяють рішенню цієї задачі. Класичний метод, пов'язаний з підігрівом металобрухту в бадді або в контейнері, не веде до бажаного результату, тому що він пов'язаний з підвищеним зношенням завалочного устаткування і більшими витратами з вирішення питань охорони навколишнього середовища. Сьогодні цей спосіб попереднього підігріву металобрухту застарів.

За останні 20 років ДСП стала швидкісною і ефективною плавильною піччю, метою якої є плавка металобрухту, окатишів і чавуну за можливо більш короткий час. ДСП працює методом дуплекс-процесу в єдиному ланцюжку з агрегатом комплексної обробки сталі (АКОС) – ківш-піч і вакуумні дегазатори. Отже, розвиток технології плавки і конструкції ДСП повністю спрямовано на зниження часу плавки від випуску до випуску. За сорокалітній період технологічні і конструктивні вдосконалення дозволили, приблизно в 4 рази знизити тривалість плавки і витрату електродів, в 2 рази зменшити витрату електроенергії.

Настільки бурхливий процес модернізації проводився по чотирьох основних напрямках. *В першу чергу* завдяки вдосконаленню технології і, головне, широкому впровадженню кисню, як у чистому виді, так і в суміші з вуглецевими газоподібними, рідкими і пилоподібними енергоносіями, що є альтернативними стосовно електроенергії. *Другий комплекс* вирішених питань пов'язаний з конструктивними змінами ДСП. Це донний випуск сталі, водоохолоджувані стіни і склепіння печі, автоматизація подачі феросплавів і шлакоутворюючих та інші конструктивні зміни. *Третя група* вирішених проблем відноситься до розробки різних варіантів попереднього підігріву металошихти. І, нарешті, *четверта група* технологічних задач, що сприяла різкому поліпшенню технологічних і економічних показників виплавки сталі в дугових печах – це організація технології дуплекс-процесу: ДСП-АКОС. Раніше були розглянуті основні положення технології вищого рівня, які базуються на основі дуплекс-процесу. ДСП нового покоління крім електроенергії споживають від 35 до 45 нм3 кисню, від 4 до 8 нм3 газу на тонну сталі, передбачають застосування паливно-кисневих пальників, інжекторів для вдування пилоподібного вуглецьвмісного матеріалу і устаткування для систем евакуації та очищення газів.

Поряд із загальноприйнятими вдосконаленнями сучасні і розроблювальні ДСП відрізняються системами та конструктивним оформленням попереднього підігріву металобрухту. В табл. 14.3 наведено характеристики діючих, проектованих і розроблювальних ДСП з попереднім підігрівом брухту.

Як порівняльні зразки печей прийняті наступні конструктивні розробки ДСП: I – надпотужна без підігріву брухту; II – з простим шахтним підігрівником брухту (Shaft Furnace); III – безперервною подачею через робоче вікно попередньо підігрітого брухту (Constееl); IV – з безперервною подачею попередньо підігрітого брухту через склепіння печі (IHI); V – двохкорпусна з одним трансформатором (Twin EAF); VI – з бічним підведенням електродів з подачею зверху попередньо підігрітого брухту (Comelt); VII – з центральною шахтою підігріву і безперервною подачею металошихти (Сontiarc); VIII – з ванною збільшеної висоти і підігрівом брухту в печі ( BSE-LEAF).

Дане порівняння є оцінним. В якості вихідних для стандартної ДСП місткістю 100 т з трансформатором 90 МВ⋅А прийняті наступні дуже високі параметри: продуктивність – 130 т/г; тривалість плавки – 45 хв; витрата електроенергії – 350 кВт⋅г/т; кисню – 40 нм3/т; газу – 6 нм3/т; електродів – 1,5 кг/т.

Як бачимо, для порівняння прийняті сім різних варіантів, що свідчить про масштабний науковий і конструкторський пошук у напрямку вдосконалення електрометалургійної технології.

В принципі зараз не існує розходження, чи є ДСП постійного або змінного струму, тому що на сьогоднішній момент для печей з однаковою встановленою потужністю і системою автоматизації можуть бути досягнуті однакові витрати по виробництву сталі.

Як параметри для порівняння використовуються не тільки споживання енергії, але також інші статті витрат, такі як зарплата персоналу, видаткові матеріали, продуктивність, інвестиції і витрати на охорону навколишнього середовища. В якості вихідних приймалися кращі виробничі показники для діючих печей і розрахункові – для дослідних і розроблювальних установок. Негативні відхилення ведуть до підвищення витрат, позитивні до їх зниження.

З нових процесів, впроваджених у виробництво, процеси в ДСП з шахтним підігрівником брухту (II) і з безперервною подачею підігрітого брухту через склепіння (IV) мають переваги в 4,5 у.г.о./т, з безперервною подачею підігрітого брухту через робоче вікно в 2,5 у.г.о. у порівнянні зі звичайною ДСП. Для двохкорпусної ДСП переваги визначаються, головним чином, продуктивністю однак при підвищених інвестиціях. Тому рекомендувати цей процес необхідно з обліком сформованою ринковою ситуацією.

**Таблиця 3.60.** Порівняльна оцінка роботи ДСП різного типу

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Показники | Т и п Д С П | | | | | | | |
| I | II | III | IV | V | VI | VII | VIIІ |
| Розробник, виробник | Danieli  Demag  ВНДІЕТО | Fuchs | Intersteel | IHI | Several | Comelt | Contiarc | ВSЕ |
| Сучасний рівень розробки | діюча | діюча | діюча | діюча | діюча | випробування | випробування | концеп-ція |
| Максимальний відсоток підігріву металошихти, % | 0 | 50-100 | 100 | 100 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| Метод завантаження брухту | порціями | порціями | безперервна | безперервна | порціями | безперервна | безперервна | однією баддею |
| Відхилення у вартісних показниках, у.г.о/т\*:  - оплата персоналу;  - енергія;  - матеріали, які витрачаються;  - продуктивність;  - інвестиції;  - охорона навколишнього середовища; | 0  0  0  0  0  0 | 0  + 5-7  -1-1,5  +2-2,5  -1,5-2  - 1-1,5 | +0,5  +6  -1  0  -2  -1 | +0,5  +7  -1,5  +2  -2  -1,5 | +0,5  -2  +4  -3  0  0 | 0  +6  0  +2  -2  0 | 0  +6  +1  +2  -2  0 | 0  +6  +2  +2  -1  0 |
| Загальне відхилення | 0 | +3-4,5 | +2,5 | +4,5 | -0,5 | +6 | +7 | +9 |

\* - – невигідні умови, підвищення витрат;

+ – переваги, зменшення витрат;

у.г.о – умовна грошова одиниця

Процеси, ще не впроваджені у виробництво і які проходять випробування, з центральною шахтою підігріву металошихти (VI, VII, VIII) обіцяють більш високі вартісні переваги в 6-9 у.г.о./т, тобто в 1,5-2 рази більше, ніж за варіантом IV. Самі більші вартісні переваги відносяться до розробки BSE (VIII). Однак дані за цим варіантом носять розрахунковий аналітичний характер, а сама розробка має концептуальний характер без детальної проробки і при відсутності промислового випробування.

Проте, в основу даних закладені реальні параметри, які вже зараз досягнуті на окремих електросталеплавильних агрегатах заводів Західної Європи. Передбачається на ДСП з ванною збільшеної висоти (VIII) одержати наступні параметри: продуктивність – 200 т/г; тривалість плавки – 45 хв.; витрата електроенергії – 270 кВт⋅г/т; витрата кисню – 35 нм3/т; витрата газу – 7 нм3/т; витрата електродів: на печах постійного струму – 0,8 кг/т, на печах змінного струму – 1,2 кг/т. При використанні низькоенергетичної ДСП (VIII) додаткове доопалювання відхідних газів відбувається в корпусі печі, що веде до поліпшення загального енергетичного балансу і спрощує систему евакуації відхідних газів.

Таким чином, можна констатувати, що сучасна ДСП, яка передбачає утилізацію енергії відхідних газів і працююча за технологією вищого рівня, може цілком конкурувати по продуктивності з конвертерним виробництвом. При застосуванні в якості сировини окатишів та інших первородних залізовмісних матеріалів, процес виробництва сталі в ДСП буде перевершувати схему: передільний чавун – конвертерна сталь. Тому прогноз на найближчі 15 років, що світове виробництво електросталі в загальному балансі виростає з 34 до 50%, цілком реальний.

4 САМОСТІЙНА РОБОТА

*Опрацювання розділів програми, які не викладаються на лекціях (128 години)*

Тема 1. Енергоживлення дугових печей постійного струму.

Тема 2. Енерготехнологічні параметри виплавки електросталі з застосуванням заліза прямого відновлення.

Тема 3. Рафінування електросталі інертними газами, шлаковими розплавами і в вакуумі.

Тема 4. Інтенсифікація електроплавки та позапічної обробки сталі.

5 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ТА ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ

*Контрольна робота (тестування)*

Заключний звіт з дисципліни передбачено складати у вигляді письмового контрольного заходу. Головною умовою допущення студента до контрольного заходу є виконання усіх вимог і форм, передбачених навчальним планом: теоретичний курс (аудиторні заняття і самостійна підготовка), практичні заняття і курсова робота.

Контрольні питання побудовані наступним чином: частина питань (приблизно 40%) – це тестові завдання закритої форми з запропонованими відповідями, з котрих вибирають одну (або декілька) вірних; тестові завдання відкритої форми (40%), котрі потребують вільно конструйованої відповіді у текстовій формі; тестові завдання у вигляді задач (20%), які потребують рішення.

Нижче наведені основні питання різноманітних форм, які передбачено включати в завдання для виконання контрольної роботи та екзаменаційні білети для підсумкового контролю знань.

*Тестові питання відкритої форми*

1. До переліку технологічних періодів виплавки електросталі надходять:

а) подрібнення метало завалки; б) нарощування електродів; в) опалювальний період.

1. Надлишок вуглецю в складі метало завалки призначено задля

а) ведення кипу; б) вилучення фосфору; в) підвищення температури.

1. Для формування шлаків електроплавки застосовуються

а) вапно; б) шамот; в) корунд; г) періклаз.

1. В металевих розплавах легуючі елементи утворюють розчини:

а) заміщення; б) впровадження; в) групи елементів (кластери).

1. До елементів, що поширюють область існування феріту, відносяться:

а) Ni, Mn, б) Cr, Ti, в) S, P.

1. Для виплавки низьковуглецевих корозійностійких сталей в склад метало завалки включають високо вуглецевий ферохром з метою:

а) зменшення окислювання хрому;

б) підвищення температури;

в) формування карбідного шлаку.

1. Режим плавлення метало завалки починається з

а) зменшеної потужності; б) найбільшої потужності транспорту.

1. Ведення кисневого кипу забезпечує:

а) підвищення температури; б) сталу температуру розплаву.

1. У понадпотужних печах робоча загрузка становить, В:

а) 900-1000; б) 1200-1500; в) 1600-2100.

1. Які шкідливі домішки вилучаються зі сталі у відновлювальному періоді електроплавки.

а) S, б) Р, в) О, г) Н.

1. У відновлювальному періоді вміст FeO(%) у шлаці становить

а) 0,5, б) 2, в) 5.

1. Десульфуруюча спроможність основних шлаків визначається вмістом

а) СаО, б) FeO; в) Al2O3, г) MgO.

1. Для виробництва сталі застосовуються електропечі:

а) руднотермічні; б) дугові; в) індукційні.

1. Під час плавлення передача тепла від дуги здійснюється:

а) випромінюванням; б) конвенцією; в) дифузією.

1. Розкислення металу призначено для:

а) вилучення кисню; б) вилучення сірки.

1. Поясність призначення шлаку впродовж плавки металу.
2. Наведіть принципову схему печі-ковша.
3. В печі-ковші наводять шлак із застосуванням

а) СаО, СаF2; б) MgO, Al2O3; в) SiO2, CaF2.

1. Виплавка сталі кислим процесом забезпечує:

а) якість металу за вмістом фосфору та сірки;

б) високі показники енерго- та матеріалозбереження.

1. Реакція дефосфорації металу:

а) екзотермічна; б) ендотермічна; в) має нульовий баланс тепла.

1. Продуктами реакції дефосфорації металу є:

а) 3СаО; Р2О5; б) СаС2; Р2О5; в) FeO; Р2О5.

*Питання закритої форми*

1. Середня швидкість окислення вуглецю складає, % С/год:

а) 0,1-0,2; б) 0,6-0,8; в) 2,0-2,5.

1. Під час відновлювального періоду з розплаву вилучаються

а) вуглець; б) кисень; в) фосфор.

1. Застосування водоохолоджуваного склепіння стінових панелей забезпечує:

а) зниження витрат часу на холодний ремонт печі:

б) зниження теплового к.к.д. печі;

в) прискорення плавлення метало завалки.

1. Залишок металу в печі після випуску ( 10%) забезпечує:

а) прискорення плавлення металобрухту;

б) умови для дефосфорації металу;

в) умови для десульфурації металу.

1. Робота печі на довгих дугах має метою:

а) ввід підвищеної потужності;

б) опалювання СО до СО2;

в) прискорення реакції розкислення сталі.

1. Розчинність водню в металі вимірюється:

а) см3/100 г; б) р.р.m; в) % мас.; г) кг/т.

1. Напишіть рівняння сталої рівноваги реакції окислення вуглецю.
2. Наведіть принципову схему вакууматора.
3. Технологія переплаву відходів призначена для:

а) підвищення якості металу; б) екології легуючих елементів.

1. Технологія виплавки сталі з пінявими шлаками застосовується для:

а) отримання полу продукту; б) рафінування металу.

1. Виплавка сталі кислим процесом забезпечує:

а) якість металу за вмістом фосфору та сірки;

б) високі показники енерго- та матеріалозбереження.

1. Константа рівноваги реакції десульфурації має вигляд:

  

1. Піняві шлаки мають у складі

а) 15-20% FeO, B>2;

б) 0,5-2% FeO, B<2;

в) 1-6% FeO, B = 1,2-1,5.

1. Піняві шлаки призначені для:

а) захисту стін печі від теплового навантаження;

б) забезпечення умов десульфурації металу;

в) зменшення шкідливих викидів.

1. Недоліком осаджуючого розкислення є:

а) залишок в металі неметалевих включень;

б) підвищення вмісту фосфору;

в) зниження температури розплаву.

1. Недоліком дифузійного розкислення є:

а) тривалий час процесу;

б) підвищення вмісту сірки;

в) підвищення температури розплаву.

1. Елемент розкислюючи спроможність котрого підвищується в умовах вакууму:

а) С, б) Si, в) Al.

1. Швидкість дифузійного розкислення металу можна підвищити за рахунок

а) підвищення температури; б) перемішування металу; в) перемішування металу зі шлаком.

1. Розкислю вальна спроможність елементів зі збільшенням їх вмісту:

а) зменшується; б) залишається сталлю; в) збільшується.

*Розрахункові завдання*

1. Визначте кількість вапна (кг/т) для забезпечення основності шлаку 2,5 за умовою окислення 0,33% Si в складі метало завалки. Ступінь недопалу вапна 15%

а) 20,8; б) 24,2; в) 27,4.

1. Визначте кількість залізної руди (кг/т) для окислення 0,3% С, прийнявши до уваги ступінь дисоціації руди до FeO 80%

а) 22,5; б) 33,6; в) 34,8.

1. Визначте потрібну кількість кисню для окислення 0,4% С зі швидкістю окислення вуглецю 0,6% С/год.

а) 11,18; б) 31,43; в) 47,43.

1. Визначте енергію перемішування розплаву (кВт/т) під час окислення 0,3% С зі швидкістю окислення вуглецю 0,8% С/год, прийнявши до уваги, що енергія реакції окислення вуглецю повністю перетворюється в механічну.

а) 25,9; б) 36,7; в) 41,7.

1. Вирахуйте активну потужність печі (Р, МВА), якщо робоча напруга становить 820 в, діаметр електроду 0,6 м, густина струму J = 30 А/см2, активний опір установки 0,1 Ом, реактивна складова 0,080 м.

а) 55,64; б) 66,75; в) 77,86.

1. Активна електрична потужність Ракт = 25 МВт, cosϕ = 0,65, U2 = 280 В. Знайти повну електричну потужність Рповн, реактивну електричну потужність Рр, вторинний струм І2.
2. Визначте тиск СО (РСО) під час окислення вуглецю на глибині 0,7 м з урахуванням даних:

ρМе = 7000 кг/м3, ρшп = 3500 кг/м3, Ншп = 0,1 м, σМе = 1 н/м, rкр = 10-3 м.

1. Визначте потужність перемішування 100 т металу в ковші висотою 2 м аргоном протягом 5 хвилин з витратою аргону 1 м3/т та його вазі 1,2 кг/м3.
2. Визначте кількість вапна (кг/т) для забезпечення основності шлаку 2,5 за умовою окислення 0,33% Si в складі метало завалки. Ступінь недопалу вапна 15%

а) 20,8; б) 24,2; в) 27,4.

1. Визначте кількість залізної руди (кг/т) для окислення 0,3% С, прийнявши до уваги ступінь дисоціації руди до FeO 80%

а) 22,5; б) 33,6; в) 34,8.

1. Розрахуйте рівноважний вміст кисню у сталі з 0,1% С в вакуумі 10 кПа.
2. Визначте ступінь десульфурації сталі (%) з початковим вмістом сірки 0,030% під час обробки синтетичним шлаком СаО/СаF2 = 3:1 в кількості 1% від маси металу. Прийняти до уваги, що розчинність СаS (ольдгаміт) у СаО становить 2,8%.

а) 31; б) 41; в) 51.

1. Визначте кількість алюмінію (кг/т), для зниження вмісту кисню з 0,01% до 0,003%. Прийняти засвоєння алюмінію 50%

а) 0,16; б) 0,86; в) 2,26.

*Таблиця 5.1 – Варіанти завдань контрольної роботи\**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № вар. | Номер питань | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 1 | 3 | 4 | 19 | 23 | 21 | 27 | 29 | 41 | 42 | 52 |
| 2 | 2 | 3 | 4 | 15 | 23 | 22 | 29 | 30 | 33 | 43 | 53 |
| 3 | 3 | 9 | 17 | 19 | 21 | 23 | 29 | 31 | 33 | 44 | 51 |
| 4 | 4 | 6 | 11 | 19 | 20 | 23 | 27 | 32 | 33 | 45 | 50 |
| 5 | 2 | 3 | 6 | 12 | 17 | 21 | 23 | 29 | 34 | 46 | 49 |
| 6 | 6 | 4 | 16 | 19 | 20 | 26 | 27 | 30 | 33 | 42 | 53 |
| 7 | 3 | 4 | 6 | 13 | 17 | 21 | 23 | 29 | 39 | 43 | 52 |
| 8 | 4 | 6 | 9 | 19 | 20 | 22 | 23 | З0 | 33 | 44 | 54 |
| 9 | 3 | 4 | 6 | 9 | 12 | 17 | 23 | 29 | 33 | 45 | 48 |
| 10 | 3 | 4 | 6 | 10 | 20 | 22 | 23 | 30 | 34 | 42 | 51 |
| 11 | 1 | 3 | 6 | 15 | 20 | 23 | 27 | 31 | 39 | 46 | 50 |
| 12 | 2 | 3 | 6 | 11 | 16 | 23 | 29 | 32 | 40 | 43 | 48 |
| 13 | 3 | 4 | 6 | 14 | 20 | 21 | 27 | 29 | 39 | 44 | 53 |
| 14 | 4 | 6 | 16 | 18 | 20 | 22 | 23 | 29 | 33 | 44 | 46 |
| 15 | 3 | 4 | 6 | 15 | 20 | 23 | 29 | 34 | 40 | 46 | 50 |
| 16 | 6 | 8 | 11 | 19 | 20 | 23 | 29 | 32 | 41 | 42 | 51 |
| 17 | 3 | 4 | 6 | 17 | 20 | 23 | 27 | 29 | 38 | 46 | 53 |
| 18 | 3 | 6 | 9 | 19 | 20 | 23 | 29 | 34 | 37 | 43 | 50 |
| 19 | 3 | 6 | 9 | 17 | 20 | 21 | 23 | 29 | 40 | 45 | 46 |
| 20 | 3 | 6 | 10 | 14 | 19 | 23 | 27 | 32 | 36 | 44 | 52 |
| 21 | 4 | 6 | 15 | 17 | 22 | 23 | 29 | 34 | 40 | 43 | 47 |
| 22 | 1 | 3 | 6 | 11 | 20 | 23 | 29 | 30 | 37 | 44 | 50 |
| 23 | 2 | 3 | 6 | 19 | 20 | 21 | 23 | 29 | 40 | 45 | 51 |
| 24 | 3 | 6 | 12 | 13 | 18 | 23 | 29 | 34 | 39 | 42 | 53 |
| 25 | 4 | 6 | 15 | 17 | 20 | 21 | 23 | 39 | 41 | 45 | 50 |
| 26 | 3 | 4 | 6 | 12 | 20 | 22 | 23 | 29 | 39 | 46 | 51 |

\*- номера питань відповідають переліку питань до дисципліни

**РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Проектирование и оборудование электросталеплавильных и ферросплавных цехов: Учебник В.А. Гладких, М.И. Гасик, А.Н. Овчарук, Ю.С. Пройдак.- Днепропетровск: Системные технологии, 2004. - 736 с.

2. Електрометалургія феросплавів, спеціальних сталей і сплавів // Поляков О.І., Гасик М.І., Дніпропетровськ, Системные технологии, 2009 -116 с.

3. Теория и технология электроплавки стали /Чуйко Н.М., Чуйко А.Н. - К. Вища школа 1983.-248 с.

4. Величко А.Г. Теория и практика внепечной обработки металла. Днепропетровск : НМетАУ, 1998 - 103с.

5. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электросталеплавильных печей -М.: МИСИС, 2000.-272с.

6. Разработка и освоение инновационной технологии выплавки подшипниковой электростали ШХ15СГ-В / А.И.Панченко, А.С.Сальников, М.И.Гасик // Современная электрометаллургия. – 2010. - №4. – С. 30-36.