

**УДК 669.18:621**

## **ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ДУГОВОЇ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ПЕЧІ**

*Прилуцький М. І., Фольваркова Л. О., Кубай О. І.*

*Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”*

*У роботі описані експериментальні і чисельні дослідження енергетичного балансу дугової сталеплавильної печі, а також приведений приклад розрахованого енергетичного балансу ДСП – 20.*

*В работе описаны экспериментальные и численные исследования энергетического баланса дуговой сталеплавильной печи, а также приведен пример рассчитанного энергетического баланса печи ДСП – 20.*

*The article describes experimental and numerical research of energy balance of arc furnace. And also there is example of calculated energy energy balance AF-20.*

### **Вступ**

При оцінюванні енергетичного режиму електропечі слід враховувати теплові потоки випромінюванням та конвекцією від стін і склепіння, які є наслідком акумульованого футерівкою тепла. Ці потоки в окремі періоди можуть навіть перевищувати випромінювання від дуги. Крім того, значне підсилення потужності газовидалення може призвести до зменшення тепла екзотермічних реакцій за рахунок виносу допалювання окису вуглецю в газоходи системи газовидалення.

Складання енергетичного балансу такого великого і складного агрегату як дугова піч, потребує тривалого і ретельного її обстеження і обходиться досить дорого. Тим не менше для будь-якої ДСП варто рекомендувати таке обстеження, так як складений баланс дає ясну картину всього процесу і дозволяє підібрати міри для покращення використання печі і її витратних показників.

### **Постановка задачі дослідження**

Дослідити процес складання енергетичного балансу ДСП.

## Опис роботи

Енергетичний баланс ДСП складається із прихідних і витратних статей:

а) *Прихід енергії*:  $Q_{1.1}$  – тепло, яке вноситься в піч з електричною енергією;  $Q_{1.2}$  – тепло, яке вноситься в піч разом із шихтою;  $Q_{1.3}$  – тепло, що виділяється в печі при проходженні в ванні екзотермічних реакцій;  $Q_{1.4}$  – тепло, що виділяється при окисленні вуглецю електродів.

б) *Витрати енергії*:  $Q_{2.1}$  – тепло продуктів плавки – сталі і шлаку;  $Q_{2.2}$  – тепло, яке поглинається при проходженні в ванні ендотермічних реакцій;  $Q_{2.3}$  – всі види теплових втрат печі;  $Q_{2.4}$  – електричні втрати установки.

Роботу агрегату характеризують наступні енергетичні показники:

Тепловий ККД:

$$\eta_m = \frac{Q_{1.1} + Q_{2.2} + Q_{1.2}}{Q_{1.1} + Q_{1.3} + Q_{1.4}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Електричний ККД:

$$\eta_{ел} = \frac{Q_{1.1} - Q_{2.4}}{Q_{1.1}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Питомі витрати електроенергії, кВт·год/т:

$$W = Q_{1.1}/G, \quad (3)$$

де  $G$  – ємність печі, т.

У вказаних статтях енергетичного балансу не враховано зміну тепла, акумульованого кладкою печі за час плавки, тобто прийнято, що це тепло залишається незмінним. Це має місце лише при безперервному процесі і гарній повторюваності плавки, тому це припущення підходить лише для печей великої ємності, що використовуються для виплавляння злитків. Для малих печей, які виплавляють сталь для фасонного лиття і, які часто працюють в дві або одну зміну, це не допускається.

Підрахунок змін акумульованого кладкою тепла доволі важкий, так як потребує вимірів і внутрішніх, і зовнішніх температур кладки на початку і в кінці плавки. Навіть за результатами вимірів підрахунок носить доволі приблизний характер, оскільки нестационарний реальний процес при розрахунках доводиться замінити стаціонарним. Однак енергетичний баланс можна скласти доволі точно і для періодично працюючих печей, якщо замість акумульованого кладкою тепла врахувати теплові втрати печі

за час її простою. В цьому випадку теплові втрати печі повинні включати втрати тепла як за період плавки, так і за час її простою.

Визначення статей енергетичного балансу дугової печі проводиться як експериментальним, так і розрахунковим шляхом.

Тепло  $Q_{1.1}$ , яке вноситься в піч з електричною енергією, визначають за показниками електричних лічильників активної енергії, встановлених на печі. Його значення у відповідності з характеристиками звичайних лічильників можна визначити з точністю до 2%. При наявності на печі лічильника реактивної енергії можна одночасно визначити середньозважений коефіцієнт потужності установки за період плавки. Якщо при плавці в піч не враховувати кисень, то доля електроенергії в загальному приході енергії є домінуючою, досягаючи 80 – 90%. При використанні кисню ця доля може знизиться до 60 – 70%.

Тепло  $Q_{1.2}$  являє собою тепловміст продуктів, які вводяться в піч в період плавки: скрап, руда, кокс, феросплави, легуючі добавки, шлакоутворюючі і інші матеріали. Для розрахунку їх тепловмісту по їх теплоємності слід організувати їх масу та температуру. Значення  $Q_{1.2}$  в печах, які працюють на твердій завалці, мале, тому його можна не враховувати, але в печах, які працюють на рідкій завалці, воно може складати основну прихідну статтю балансу. В останньому випадку його визначити складно, так як потрібно знати масу матеріалу, який заливається в піч, а зазвичай в цехах немає ваги, за допомогою якої можна було б зважити ківш разом з металом. Тому масу металу доводиться визначати за об'ємом ковша, тобто приблизно. Температура металу, який заливається в піч може бути визначена оптичним пірометром або за допомогою термомпарі занурення.

Теплоту екзотермічних реакцій  $Q_{1.3}$  можна визначити тільки розрахунком при проведенні одночасно з енергетичним матеріального балансу плавки, який дає кількісне співвідношення реагуючих елементів. Приблизно цю статтю балансу можна приймати із літературних даних – балансів аналогічних технологічних процесів. Величина  $Q_{1.3}$  за відсутності введення кисню складає від 8 до 12% загального приходу тепла. Однак при використанні вона може складати до 30 -40%.

Теплоту  $Q_{1.4}$  від окислення електродів легко знайти, зважуючи або обміряючи електроди на початку і в кінці плавки. При згоранні 1 кг графіту виділяється приблизно 33500 кДж, і якщо угар електродів за плавку дорівнює  $Q_{ел}$ , то

$$Q_{1.4} = 0,6 \cdot 33500 Q_{ел} \quad (4)$$

Коефіцієнт 0,6 враховує, що не все тепло від згорання електродів виділяється всередину печі.

Значення  $Q_{1,4}$  складає 2 – 4% загального приходу тепла.

Тепло продуктів плавки  $Q_{2,1}$  знаходять шляхом підрахунку тепловмісту металу шлаку, який виливають з печі. Температура їх визначається шляхом оптичним або термоелектричним пірометром, а маса металу – шляхом зважування злитків або виливок і сплесків після охолодження. Шлак також зважують. Тепло продуктів плавки складає 50 – 60% загального приходу тепла, в тому числі на долю шлаку приходить 7 – 10%.

Тепло ендотермічних реакцій  $Q_{2,2}$  визначають розрахунковим шляхом за даними матеріального балансу, як і тепло екзотермічних реакцій. Воно складає 4 – 8% загальних витрат теплоти.

Теплові втрати печі складають 25 – 35% загальних витрат тепла; їх визначають за окремими складовими. Втрати через футеровку підраховуються за формулами теплопередачі через складну стінку окремо для склепіння, стін і подини, при чому доводиться задаватися температурами всередині печі і навколишнього повітря. Проте, втрати тепла через футеровку електропечі можна розрахувати без суттєвої похибки за залежністю для тонкої стінки:

$$Q_{2,3ф} = \lambda \cdot \frac{t_1 - t_2}{\delta}, \text{ Вт} \quad (5)$$

де  $t_1$  - температура внутрішньої поверхні кладки, °С;

$t_2$  - температура зовнішньої поверхні кладки, °С;

$\delta$  – товщина кладки, м;

$\lambda$  - середній коефіцієнт теплопровідності матеріалу ділянки кладки, Вт/(м·К).

Більш точні результати дає дослідний метод визначення теплових втрат через футеровку, коли вимірюється температура всередині печі і на поверхні її кожуха. Практичні втрати через футеровку складають від 6 до 12% загального тепла, при чому більша їх частина приходить на склепіння.

Важливими можуть виявитися також втрати випромінюванням через відкриті дверці печі, а також відкритою піччю під час завантаження і відведення при цьому склепінням, з якого тепло випромінюється на підлогу цеху. На протязі плавки робоче вікно відкрите 20 – 40% часу плавки; відповідні втрати складають 2,5 – 3,0%.

Теплові втрати через робоче вікно можна також визначити за формулою:

$$Q_{2.3\text{вип}} = C_0 \psi F_{\text{дв}} ((T_1/100)^4 - (T_2/100)^4), \quad (6)$$

де  $C_0 \approx 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$\psi$  – коефіцієнт діафрагмування;

$T_1$  – температура всередині печі, К;

$T_2$  – температура навколишнього середовища, К.

Через отвори у склепінні в вентиляцію або через газовідвід із печі виходять гази, які виносять із собою фізичне і хімічне тепло. Визначити втрати тепла з цими газами дуже важко, так як для цього потрібно розрахувати на основі їх хімічного аналізу реакції, що привели до їх утворення.

Теплові втрати з газами становлять зазвичай 2 – 4%, але у випадку введення в піч кисню їх значення набагато більше і доходять до 15 – 20% загальних втрат тепла.

Втрати з охолоджувальною водою  $Q_v$ , кВт, на діючих печах легко визначається шляхом вимірювання витрат води  $g_v$ , м<sup>3</sup>/год, лічильником та її температуру на вході  $t_1$  і виході  $t_2$ . Тоді

$$Q_v = 1,163 g_v (t_2 - t_1) \tau_{\text{пл}}, \text{ кДж}, \quad (7)$$

де  $\tau_{\text{пл}}$  – час плавки.

На кожній гілці охолоджуючої води повине бути свій кран, а витрати води по гілці повинні підтримуватися такими, щоб її температура на виході не перевищувала 40 - 45°C для уникнення підвищеного виділення накипу. Тоді, при  $t_1 = 20$  °С потрібні витрати води в метрах кубічних за годину будуть складати:

$$g_v = \frac{Q_v}{1,163(t_2 - t_1)\tau_{\text{пл}}} = (0,03 \dots 0,034) Q_v, \text{ ВТ} \quad (8)$$

Кількість тепла, яке видаляється через охолоджувальну воду, може становити 3 – 7%.

Електричні втрати зазвичай складають 8 – 10% загальних витрат електроенергії.

**Таблиця 1** Енергетичний баланс печі ємністю 20 т, при виплавці хромистих сталей з використанням кисню.

<b>Прихід</b>	
Тепло електроенергії	59,87%
Тепло хімічних реакцій	37,07%
Фізичне тепло матеріалів	1,58%
Фізичне тепло кисню та повітря	0,80%
<b>Втрати</b>	
Втрати тепла поверхнею стін та днища	5,28%
Втрати тепла поверхнею склепіння	7,37%
Втрати тепла відкритою піччю	1,62%
Втрати через робоче вікно	2,62%
Втрати з охолоджуваною водою	6,24%
Теплові втрати з газами	17,05%
Тепло хімічних реакцій	4,37%
Тепловміст сталі	46,15%
Тепловміст шлаку	9,30%

### Тенденції розвитку і покращення техніко-економічних показників

Збільшення виробництва сталі в ДСП, характерне для вітчизняної і іноземної металургії, визначає наступні тенденції розвитку технологічних процесів виплавки електросталі, удосконалення ДСП і покращення техніко-економічних показників їх роботи:

1. інтенсифікація технологічних процесів (за рахунок використання кисню, використання комплексних розкислювачів, продувка металу порошкоподібними реагентами і т. ін.) для скорочення тривалості періодів  $\tau_{ок}$ ,  $\tau_{в}$  і всієї плавки  $\tau_{пл}$  з метою підвищення згідно продуктивності ДСП, зниження згідно питомої витрати електроенергії, витрат по переробленню і собівартості в цілому;
2. перенос технологічних операцій з ДСП в ківш або спеціальні агрегати позапічної обробки і виробництва сталі високої якості, що також забезпечує скорочення  $\tau_{ок}$ ,  $\tau_{в}$  і  $\tau_{пл}$  і відповідне покращення техніко-економічних показників ДСП;
3. раціональне завантаження металошихти з заданою насипною щільністю певним співвідношення різних фракцій металобрухту, правильним розміщенням їх в робочому просторі ДСП і симетричним розміщенням під електродами для рівномірного розплавлення усієї металошихти;

4. використання в якості шихти продуктів прямого відновлення залізної руди – металізованих обкотишів і використання спеціальних ДСП з безперервним завантаженням обкотишів, що підвищує продуктивність при збільшенні  $W_y$  на 15-20% через більшу кратність шлаку (0,12 – 0,18 замість 0,05 – 0,07 при звичайній технології);
5. інтенсифікація періоду розплавлення твердої металошихти за рахунок:
  - а) завчасного підігріву шихти;
  - б) застосування паливно-кисневих пальників (ПКП), які підвищують теплову потужність ДСП при незмінній електричній потужності;
  - в) підвищення активності потужності дуг  $P_d$  або при зміні електропічного трансформатора на більш потужний;
6. комплексна механізація допоміжних операцій з обслуговування ДСП, застосування обчислювальної техніки для корегування енергетичного режиму і технологічного процесу плавки, впровадження АСКТП;
7. збільшення фактичного часу роботи ДСП за рахунок скорочення «холодних» і «гарячих» простоїв в результаті підвищення стійкості футерівки, застосування водоохолоджуваних елементів, підвищення надійності, довговічності і ремонтоспроможності механічного і електричного устаткування ДСП.

При створенні потужних і високопродуктивних ДСП необхідно також вирішувати комплекс проблем по створенню безпечних умов праці обслуговуючого персоналу (електробезпечність, рівень шуму і т. д.) і охороні навколишнього середовища (газоочистка, оборотне водопостачання і т. д.).

### Література

1. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева [Текст]: учебник для вузов / А. Д. Свенчанский, И. Т. Жердев, А. М. Кручинин и др.; под ред. А. Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с., ил.
2. Электротермическое оборудование [Текст]: Справочник / Под общ. ред. А. П. Альтгаузена. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 416 с., ил.
3. Электроплавильные печи черной металлургии [Текст]: учебник для вузов / А. В. Егоров – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.