

УДК 621.717:669.046

**Павленко А.М.** – д.т.н. проф., декан енергетичного факультету,  
Дніпродзержинський державний технічний університет (ДДТУ)

**Ялова К.М.** – ас., ДДТУ

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОДАТКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛОТИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В РОБОТІ ДУГОВИХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНИХ ПЕЧЕЙ**

*В роботі наведено результати аналізу процесів теплообміну в дугових сталеплавильних печах при використанні додаткових джерел теплоти. Визначено оптимальну масу завантаження при використанні залишку рідкого металу – «болота», в якості додаткового джерела теплоти. Теоретично обґрунтовано ефективність використання паливнокисневих пальників в умовах сьогодення з метою інтенсифікації процесів тепломасообміну. Представлено аналіз розрахункових даних стосовно впливу використання додаткових джерел теплоти на тривалість процесу плавлення.*

*Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, теплообмін, паливнокисневі пальники.*

### **Постановка проблеми**

Плавлення металошихти в багатовантажних печах потребує значної витрати електроенергії, а в умовах постійного підвищення цін на енергоресурси питання зменшення промислових витрат стає дедалі актуальнішим. В теперішній час на розплавлення шихти в ДСП витрачається до 80 % від загальної кількості, витраченої на плавку енергії [1]. Ведення плавки в печі може відбуватися двома способами: з заваркою на суху, очищену від попередньої плавки подину і з використанням залишку від попередньої плавки – «болотом». Використання «болота» призводить до підвищення продуктивності дугових печей та зменшення загальної тривалості плавки. Це досягається за рахунок того, що в момент завантаження нової порції шихти температура залишкового «болота» дорівнює температурі ліквідусу сталі, і є вищою за температуру «сухої» футеровки. Тому «болото» можна розглядати, як додаткове джерело теплоти.

В процесі розплавлення твердої шихти приблизно 1/3 необхідної енергії може бути отримана за рахунок використання більш дешевого палива: мазуту або газу. Окрім зниження витрат електроенергії при цьому зменшується і витрата електродів. При відносно невеликих ви-

тратях палива, характерних для сучасних паливнокисневих пальників (ПКП), їх використання забезпечує інтенсивну тепловіддачу до шихтових матеріалів від продуктів спалення за рахунок конвекції і випромінювання. Основне завдання роботи паливно-кисневих пальників – створення додаткових осередків прогріву і проплавлення металу в периферійних областях печі. Особливо доцільно використання ПКП при роботі багатовантажних печей, в яких для прогріву пристінкових областей витрачається значна кількість часу.

### Аналіз досліджень і публікацій

Незважаючи на невпинне зростання долі електросталеплавильного виробництва у виробництві сталі в світі і в Україні аналізу теплофізичних процесів, що відбуваються в робочому просторі дугових печей, присвячено вельми обмежений перелік робіт. В роботах Єгорова А.В., Нікольського Л.Е., Моржина А.Ф. [1 – 3] наведені загальні відомості про способи і технології, що використовуються для інтенсифікації процесу плавлення металошихти. При цьому не встановлено взаємний вплив використовуваних технологій на тепловий баланс і тривалість плавки.

### Формулювання мети роботи

Завданням цієї роботи є проведення чисельного моделювання процесу плавлення металошихти при використанні додаткових джерел теплоти з метою визначення їх впливу на тривалість процесу плавлення металошихти в робочому просторі дугових сталеплавильних печей.

Щоб встановити вплив використання «болота» та визначити найбільш ефективну його первинну масу були прийняті наступні умови:

1) моделювання відбувалось для маси первинного «болота» від  $m_{\sigma}^0 = 0$  тонн (завантаження на суху подину) до  $m_{\sigma}^0 = 20$  тонн, з кроком додавання маси  $\Delta m_{\sigma}^0 = 5$  тонн;

2) в розрахунках приймалась умова, що маса отриманого розплаву повинна бути  $m_{\sigma} = 100$  тонн;

3) додавання маси «болота»  $\Delta m_{\sigma}^0$  відбувалось за рахунок віднімання відповідної маси від маси першої завалки, маса другої завалки залишалась незмінною;

4) моделювання здійснювалось для наступних схем завантажень: I – маса залишкового «болота»  $m_{\sigma}^0 = 20$  тонн, маса першої завалки  $m_{u1}^0 = 40$  тонн, маса другої завалки  $m_{u2}^0 = 40$  тонн; II –  $m_{\sigma}^0 = 15$  тонн,  $m_{u1}^0 = 45$  тонн,  $m_{u2}^0 = 40$  тонн; III –  $m_{\sigma}^0 = 10$  тонн,  $m_{u1}^0 = 50$  тонн,

$m_{ш2}^0 = 40$  тонн; IV –  $m_б^0 = 5$  тонн,  $m_{ш1}^0 = 55$  тонн,  $m_{ш2}^0 = 40$  тонн;  
V –  $m_б^0 = 0$ ,  $m_{ш1}^0 = 60$  тонн,  $m_{ш2}^0 = 40$  тонн.

Для оцінки ефективності використання ПКП необхідно врахувати наступні критерії: співвідношення вартості одиниці теплової енергії, отриманої в результаті перетворення електричної енергії, і вартості одиниці теплової енергії, отриманої при безпосередньому спалюванні мазуту або газу; коефіцієнт використання палива від ПКП і вплив цього використання на загальну тривалість плавлення. Тобто треба приймати до уваги наступні умови:

$$B_n + B_{ел.ен} \leq B_{з.ел.ен} \text{ при } Q_{газ} + Q_{ел.ен} \geq Q_{з.ел.ен} \text{ при } t_{газ,ел.ен} \leq t_{ел.ен}, \quad (1)$$

де  $B_n$  – грошові витрати на газ або паливо, що використовуються для спалення в ПКП,  $B_{ел.ен}$  – грошові витрати на застосувану електроенергію,  $B_{з.ел.ен}$  – загальні грошові витрати на електроенергію без використання додаткових видів палива,  $Q_{газ}$  – кількість теплоти, отримана шихтою від спалювання палива в ПКП,  $Q_{ел.ен}$  – кількість теплоти, отримана шихтою від роботи дуг,  $Q_{з.ел.ен}$  – загальна кількість теплоти від дуг без використання додаткових джерел теплоти,  $t_{газ,ел.ен}$  – загальний час плавлення шихти при використанні теплоти ПКП і електричних дуг,  $t_{ел.ен}$  – загальний час плавлення шихти при використанні лише енергії дуг.

Вхідними параметрами моделювання роботи пальників були їх технічні характеристики, існуючі режими роботи, а для стінових пальників – і координати розташування. Так, середня витрата природного газу  $V_p$  при нормальних умовах складає для стінових пальників до  $500 \text{ м}^3/\text{г}$ , для стінового і еркерного – до  $200 \text{ м}^3/\text{г}$ . В розрахунках будемо вважати, що пальники працюють в режимі максимальної витрати газу. Увімкнення стінових і дверного пальників проводиться через дві хвилини після початку процесу плавлення завалок, а еркерного – за 10 хвилин до безпосереднього зливу металу. Оскільки об'єктом дослідження є процес розплавлення шихти, а окислювальний, відновлювальний періоди і процес зливу металу в цій роботі не розглядаються, то роботою еркерного пальника будемо нехтувати. Тривалість роботи стінових пальників складає 16 хвилин для першої завалки і 10 хвилин для другої. Чисельне моделювання теплової роботи ПКП здійснювалось на основі розробленої математичної моделі [4].

### Результати роботи

Технологія виплавки сталі з використанням «болота» передбачає, що при зливанні розплаву в печі залишиться така маса рідкого металу, яка буде використовуватися в якості «болота» для наступної плав-

ки. В залежності від обраної схеми завантаження шихти в піч маса отриманого розплаву (злитого з печі) буде зменшуватися в залежності від збільшення маси «болота». Оскільки маса отриманого розплаву без «болота» буде різною для кожної з обраної схеми завантаження при визначенні оптимальної схеми завантаження, доцільно використовувати наступну умову:

$$\frac{m_p}{\tau} \rightarrow \max, \quad (2)$$

де  $m_p$  – маса отриманого розплаву,  $\tau$  – тривалість процесу розплавлення завантаженої металошихти.

Розрахунок проводився при використанні розробленої тривимірної моделі теплової роботи дугової печі з урахуванням особливостей тепломасообміну для кожного етапу розплавлення шихти [5].

Проаналізувавши отримані дані щодо етапу проплавлення колодязів, необхідно зауважити, що, по-перше, час проплавлення колодязів тим більше, чим більше маса першої завалки, при цьому тривалість етапу проплавлення колодязів збільшується на 10 – 12 % при кожному збільшенні маси першої завалки на 5 т або, відповідно, при кожному зменшенні залишкового «болота» на 5 т. По-друге, маса отриманого розплаву в момент завершення етапу проплавлення колодязів для першої завалки приймає своє максимальне значення  $m_p^{кол} \approx 9$  т для схеми завантаження V і мінімальне значення  $m_p^{кол} \approx 4$  т для схеми завантаження I, тобто маса отриманого розплаву збільшується в залежності від збільшення маси завантаження.

Початкова маса розплаву для етапів закритого і відкритого горіння дуг є маса розплаву, отримана за період розплавлення колодязів. Маса розплаву в момент завершення етапів закритого і відкритого горіння дуг при розплавленні першої завалки дорівнює масі першого завантаження  $m_{ш1}^0 = 60$  т і є однаковою для всіх наведених схем завалок. Маса розплаву при розплавленні першої завалки, отриманого за період плавлення закритими і відкритими дугами, розраховується наступним чином:

$$m_p^{1зав} = m_{ш1}^0 - m_p^{кол} - m_{б}^0, \quad (3)$$

де  $m_{ш1}^0$ ,  $m_p^{кол}$ ,  $m_{б}^0$  – відповідно маса першої завалки, маса розплаву, отриманого в період розплавлення колодязів, та маса залишкового «болота». Використовуючи (3), відповідно для I – V схем завантаження, були отримані наступні маси розплаву: 36 т, 40 т, 43 т, 47 т, 51 т. Оскільки величини тривалості і маси отриманого розплаву є змінними для розглядуваних схем завантаження, то при обґрунтуванні найбільш доцільної маси першої завалки будемо використовувати спів-

відношення отриманого розплаву до витраченого часу і умови (2). Виходячи з умови (2), найбільш доцільною схемою завантаження є схема I, співвідношення маси розплаву якої до витраченого часу, наближується до значення 1 т/хв. Також було визначено, що схема завантаження V, де плавлення відбувається без використання «болота», є самою не вигідною з точки зору швидкості процесу плавлення, яка складає приблизно 0,76 т/хв.

Оскільки за вказаними вхідними умовами маса другої завалки є однаковою для всіх розглядуваних схем завантаження, а маса рідкого розплаву буде достатньою для забезпечення однакового підняття його рівня під вагою завалочних матеріалів, то динаміка, час і маса отриманого розплаву при розплавленні другої завалки буде ідентичною для всіх схем завалок.

Дані чисельного моделювання загального процесу плавлення обох завалок при використанні змінної маси «болота», представлені на рис. 1.

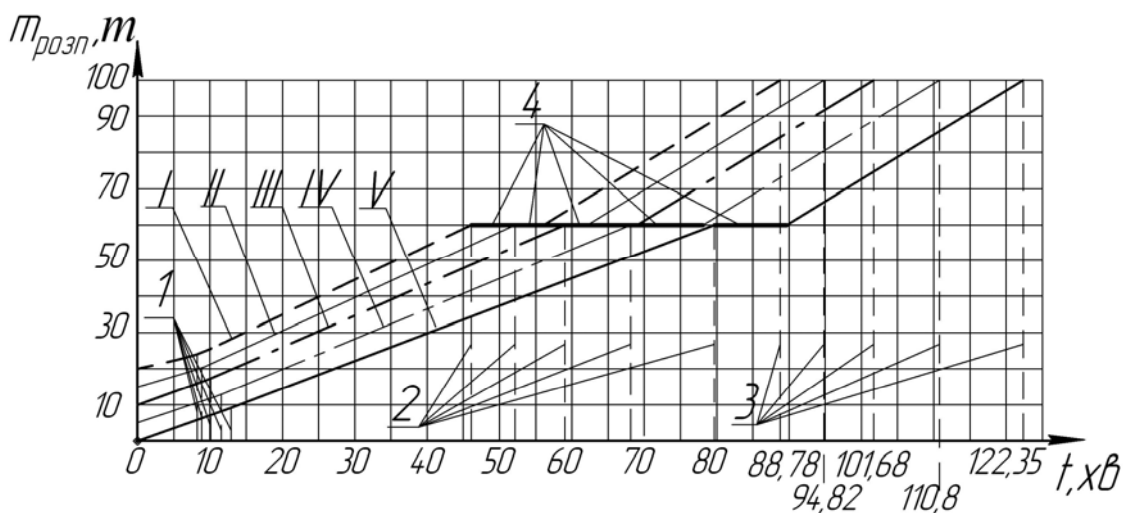


Рис. 1. Залежність маси розплаву від загальної тривалості плавлення:

- 1 – момент завершення етапу проплавлення колодязів;
- 2 – момент часу завершення етапів закритого і відкритого горіння при розплавленні першої завалки;
- 3 – загальна тривалість плавки;
- 4 – час завантаження другої завалки

Хоча маса розплаву в момент завершення стадії плавлення є однаковою для всіх розглядуваних мас завантажень і дорівнює  $m_{\sigma} = 100$  тонн, маса розплаву, отриманого при плавленні, розраховується як:

$$m_p = m_{\sigma} - m_{\sigma}^0 \quad (4)$$

Значення розплаву, отриманого в процесі плавлення для схем завантаження I – V згідно (4), складає відповідно 80 т, 85 т, 90 т, 95 т, 100 т. Зі збільшенням маси отриманого розплаву, час, який витрачається для його отримання, теж збільшується. Змінні величини маси отриманого розплаву і витраченого часу призводять до необхідності використання умови (2) при визначенні найбільш доцільної схеми завантаження. Розрахувавши співвідношення маси отриманого розплаву до витраченого часу та використавши умову (2), було визначено, що плавлення шихти з використанням I схеми завантаження є більш вигідним в порівнянні з іншими схемами завантаження, які розглядалися. Швидкість плавлення для I схеми завантаження складає приблизно 0,9 т/хв. і це значення зменшується до приблизно 0,8 т/хв. для V схеми завантаження.

Витрати електроенергії при розплавленні металошихти з використанням розглядуваних схем завантаження можна визначити за наступною формулою [6]:

$$W = P_{mp}\tau, \quad (5)$$

де  $P_{mp}$  – потужність пічного трансформатора, МВт;  $\tau$  – час плавлення металошихти, год. Потужність пічного трансформатора приймали незмінною при розплавленні вказаних схем завантаження. Витрати електроенергії  $W$  при розплавленні шихти відповідно до схем завалок I – V приблизно дорівнюють 59,2 МВт·год, 63,2 МВт·год, 67,8 МВт·год, 77,7 МВт·год та 81,5 МВт·год. При цьому не враховується кількість електроенергії, яка була витрачена для отримання «болота» відповідної маси  $m_{\text{б}}^0 = 20$  т, 15 т, 10 т, 5 т, 0 т. Для визначення загальної кількості електроенергії  $W_{\text{заг}}$ , що була витрачена для отримання розплаву  $m_{\text{б}} = 100$  т, будемо враховувати:

$$W_{\text{заг}} = W + W_{\text{б}}, \quad (6)$$

де  $W$ ,  $W_{\text{б}}$  – відповідно питомі витрати електроенергії, що була витрачена для розплавлення твердої шихти і для отримання «болота», МВт·год.

На основі виразів (5) і (6), були отримані наступні значення загальних витрат електроенергії: 76 МВт·год, 76,4 МВт·год, 76,8 МВт·год, 78,2 МВт·год та 81,5 МВт·год. Враховуючи той факт, що маса розплаву є однаковою для різних схем завантаження і дорівнює 100 т, значення питомих витрат електроенергії відповідно дорівнюють: 760 кВтг/т, 764 кВтг/т, 768 кВтг/т, 782 кВтг/т та 815 кВтг/т.

Зменшення витрати електроенергії при збільшенні маси «болота» є непропорційним і приймає своє максимальне значення при плавлен-

ні I схеми завантаження, що передбачає плавлення з масою «болота» 20 т. З чого можна зробити висновок, що лише за рахунок використання «болота», яке є додатковим джерелом теплоти, можна досягти економії електроенергії 4 – 7 %.

Невпинне підвищення ціни експортного природного газу призводить до необхідності оперативного корегування існуючих технологій. З метою визначення ефективності використання паливнокисневих пальників в сучасних економічних умовах і можливості економії електроенергії було проведено чисельне моделювання процесу плавлення шихти з використанням пальників і без нього. Розрахунки процесу плавлення шихти при використанні пальників проводились для схеми завантаження I, де: маса залишкового «болота»  $m_o^0 = 20$  тонн, маса першої завалки  $m_{u1}^0 = 40$  тонн, маса другої завалки  $m_{u2}^0 = 40$  тонн. Оцінити відмінність процесів плавлення шихти при використанні пальників і без них можна за допомогою рис. 2, де наведено результати чисельного моделювання.

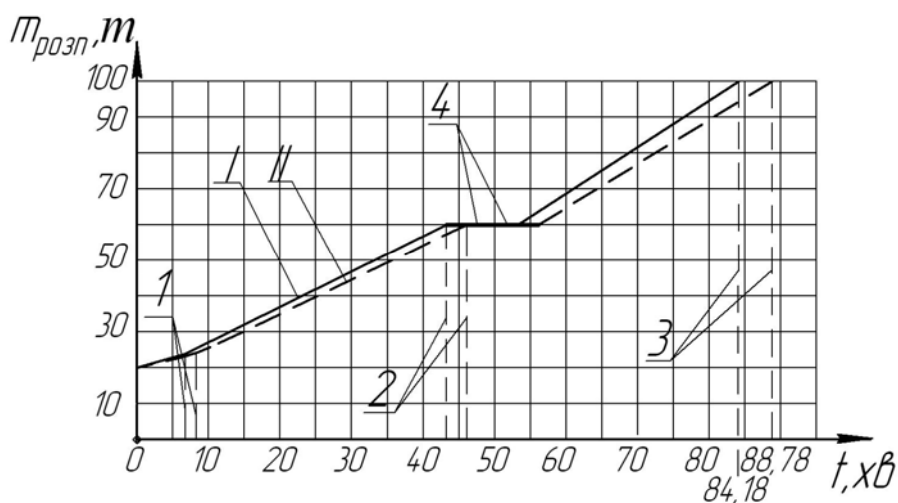


Рис. 2. Залежність маси розплаву від загальної тривалості розплавлення шихти:

- I – без використання пальників; II – при використанні пальників;
- 1 – час завершення проплавлення колодязів;
- 2 – час завершення етапів закритого і відкритого горіння дуг;
- 3 – загальний час розплавлення завалок;
- 4 – час завантаження другої завалки в піч

З аналізу даних (рис. 2), можна запевнитися, що використання теплоти спалюваного газу в якості додаткового джерела теплоти призводить до скорочення часу плавлення для всіх розглянутих етапів плавлення шихти. Загальна тривалість розплавлення шихти з використанням пальників скорочується приблизно на 5 %.

За допомогою (5) було розраховано витрати електроенергії в процесі плавлення в обох випадках, які складають відповідно 59 МВтг та 56 МВтг, а відносне відхилення цих значень дорівнює скороченню витрат електроенергії приблизно на 5 %. Оцінити середні значення технологічних параметрів виплавки сталі з використанням і без використання пальників можна за допомогою таблиці 1.

Таблиця 1  
Технологічні параметри виплавки сталі з використанням пальників і без них

Режим роботи печі	Час плавлення, год	Витрата електроенергії за плавку, кВтг	Питома витрата електроенергії, кВтг/т	Витрата газу, м <sup>3</sup>	Витрата кисню, м <sup>3</sup>	Час роботи одного пальника, г
Без пальників	1,48	59186	59	-	-	-
З пальниками	1,4	56120	56	215	200	0,43

Оцінюючи дані, наведені в табл. 1, можна дійти висновку, що використання пальників дає змогу економити електроенергію, в той же час це призводить до промислових витрат на газ, який використовується для спалювання в пальниках. Для оцінки грошових витрат на енергоносії були враховані умови (1) і діючі тарифи на природній газ і електроенергію для промисловості та ціна на технологічний кисень. Було встановлено, що плавка з використанням енергії газу, який спалюється в ПКП, коштує до 150 гривень дешевше за плавку при використанні лише енергії дуг. Зважаючи на середньорічну кількість плавок в умовах конкретного виробництва (приблизно 2000 плавок на рік), можна дійти висновку, що зниження експлуатаційних витрат при використанні ПКП складає приблизно 300 тис. грн. на рік.

### Висновки

В роботі проаналізовано процес плавлення металошихти з урахуванням особливостей теплообміну при використанні додаткових джерел теплоти. В якості додаткових джерел теплоти розглянуто технологію плавлення шихти з використанням залишку рідкого металу від попередньої плавки і теплова робота паливнокисневих пальників.

Шляхом чисельного моделювання отримано дані стосовно впливу використання теплоти «болота» на швидкість протікання теплофізичних процесів і тривалість процесу плавлення в цілому, економії електроенергії. Так за рахунок використання «болота» можна досягти економії електроенергії 4 – 7 %. Зменшення витрати електроенергії при збільшенні маси «болота» є непропорційним і приймає своє максимальне значення при плавленні з масою «болота» 20 т.



З даних чисельного моделювання плавлення металошихти з використанням ПКП обґрунтовано, що в існуючих економічних умовах використання паливнокисневих пальників, в якості додаткових джерел прогрівання шихти, є доцільним. Використання теплоти спалюваного газу дає змогу зменшити загальну тривалість процесу плавлення шихти, підвищити продуктивність печі, за рахунок чого зменшити витрати електроенергії.

### Список літератури

1. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей : [учеб. пособие для вузов] / А. В. Егоров. – М. : МИСИС, 2000. – 272с.
2. Никольский Л. Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Никольский Л. Е., Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н. – М. : Metallurgia, 1981. – 320 с.
3. Егоров А. В. Электрические печи (Для производства сталей) : [уч. пособие для студ. метал. спец. вузов] / А. В. Егоров, А. Ф. Моржин. – М. : Metallurgia, 1975. – 351 с.
4. Ялова К. М. Математичне моделювання теплової роботи паливнокисневих пальників в робочому просторі дугової сталеплавильної печі / К. М. Ялова, А. М. Павленко // Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепродзержинск : ДГТУ. – 2008. – № 9. – С. 98–103.
5. Яловая Е. Н. Разработка математической модели и метода для расчета кинетики плавления металлошихты в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи / Е. Н. Яловая, В. Ю. Болотов // Математичне моделювання. – Днепродзержинск : ДГТУ. – 2008. – № 1 (18). – С. 25–28.
6. Макаров А. Н. Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах: [уч. пособие] / А.Н. Макаров. – Тверь : ТГТУ, 1998. – 183 с.

*Рукопис надійшов 22.09.2009 р.*