

Жаданос О.В., Дерев'яно І.В., Петренко М.С., Шепетяк Є.А., Мацішин В.Г.
Дослідження та аналіз теплоенергетичних під час позапічної
обробки сталі в агрегаті ківш-піч ємністю 100 тон

Zhdanos O.V., Derevianko I.V., Petrenko M.S., Shepetiak E.A., Matsyshyn V.G.
Research and analysis of thermal energy processes during secondary
steelmaking in the ladle-furnace with the capacity of 100 tons

Мета. Температура розплаву – один з найбільш важливих технологічних параметрів, котрий контролюється під час обробки сталі на установці ківш-піч. Дослідження показали, що далеко не завжди при обробці забезпечуються режими ефективного нагрівання розплаву, що гарантовані постачальниками установок за контрактом. Причиною цього є значне відхилення значень вхідних параметрів процесу (товщини шлакового покриву, маси розплаву, температури футеровки ковша, витрат аргону, початкової температури розплаву). Температура розплаву контролюється шляхом проміжних вимірів термодатчиками, виконання яких можливе лише при відключенні установки, що призводить до збільшення тривалості обробки, витрат тепла і зниження енергетичного і теплового к.к.д. установки. Тому необхідно для прогнозування температури розплаву розробити математичну модель, яка, з одного боку, досить точно прогнозувала динаміку температури розплаву, а з іншого (для спрощення її інтеграції в АСУ), описувалася б досить простими аналітичними виразами з мінімумом вхідних параметрів. Також розробка математичної моделі динаміки теплового стану розплаву в агрегаті ківш-піч відкриває нові можливості задля вдосконалення існуючих систем автоматизованого управління, що є дуже важливим з точки зору реалізації парадигми Індустрія 4.0 на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України. **Методика.** Розроблено теплофізичну модель динаміки теплового стану розплаву в агрегаті ківш-піч ємністю 100 т. З використанням балансових рівнянь виконано розрахунок динаміки теплового стану розплаву. Оцінені статті енергетичного балансу агрегату ківш-піч. **Результати та наукова новизна.** Розроблена динамічна модель теплових процесів в агрегаті ківш-піч, в якій, на відміну від отриманих раніше теплофізичних моделей врахована наявність відкритої поверхні металу, площа якої залежить від інтенсивності продувки інертним газом, а також нестационарність початкових умов всередині футеровки ковша. Модель адаптована до реальних промислових умов. **Практична цінність.** Отримані аналітичні вирази зміни температури розплаву дозволяють інтегрувати розроблену модель в існуючі АСУ позапічної обробки сталі. Аналіз статей енергетичного балансу установки показує, що існують резерви підвищення енергетичного і теплового к.к.д. установки.

Ключові слова: позапічна обробка сталі, установка ківш-піч, теплоенергетичні процеси, температура рідкої сталі, енергетичний баланс, автоматизована система управління.

The goal. The temperature of the melt is one of the most important technological parameters that is controlled during steel processing on the ladle-furnace. Research has shown that not always during processing, the regimes of effective heating of the melt are ensured, which are guaranteed by the suppliers of the equipment under the contract. The reason for this is the significant deviation of the input process parameters (thickness of the slag coating, mass of the melt, temperature of the furnace lining, argon flow rate, and initial temperature of the melt). The melting temperature is controlled by intermediate measurements using thermocouples, which can only be performed when the unit is switched off, leading to an increase in processing time, heat loss, and a decrease in the energy and thermal efficiency of the unit. Therefore, it is necessary to develop a mathematical model for predicting the melting temperature, which, on the one hand, would quite accurately predict the dynamics of the melting temperature, and on the other hand (for simplifying its integration into the ACS), would be described by fairly simple analytical expressions with a minimum of input parameters. The development of a mathematical model of the dynamics of the thermal state of the melt in the ladle-furnace unit also opens up new opportunities for improving existing automated control systems, which is very important from the point of view of implementing the Industry 4.0 paradigm in the enterprises of the Ukrainian mining and metallurgical complex. **Methodology.** A thermophysical model of the dynamics of the thermal state of the melt in a 100-ton ladle-furnace unit has been developed. Using balance equations, calculations of the dynamics of the thermal state of the melt have been carried out. The energy balance items of the ladle-furnace unit have been estimated. **Results and scientific novelty.** A dynamic model of thermal processes in a ladle-furnace unit has been developed. Unlike previously obtained thermophysical models, this model takes into account the presence of an open metal surface, the area of which depends on the intensity of purging with inert gas, as well as the non-stationarity of the initial conditions inside the ladle lining. The model has been adapted to real industrial conditions. **Practical value.** The obtained analytical expressions for the change in melt temperature allow the integration of the developed model into existing automated control systems (ACS) for secondary steelmaking. The analysis of the unit's energy balance items shows that there are reserves for increasing its energy and thermal efficiency.

Keywords: secondary steelmaking, ladle-furnace unit, thermal energy processes, liquid steel temperature, energy balance, automated control system.

© Жаданос О.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
 Дерев'яно І.В. – к.т.н., доц. УДУНТ
 Петренко М.С. - УДУНТ
 Шепетяк Є.А. - УДУНТ
 Мацішин В.Г. - УДУНТ

© Zhdanos O. – c.t.s., docent USUST
 Derevianko I. – c.t.s., docent USUST
 Petrenko M. – USUST
 Shepetiak E. – USUST
 Matsyshyn V. – USUST



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Вступ. Постійне збільшення вимог до якості сталей, що виплавляються, обумовлює популярність позапічної обробки сталі. Одним з основних агрегатів позапічної обробки є установка ківш-піч (УКП), яка призначена для доведення сталі за хімічним складом, десульфурзації і підігріву розплаву перед наступними технологічними операціями. Робота УКП характеризується різним режимом нагріву в залежності від включеної потужності трансформатора, що використовується. Нагрівання металу починають на більш низьких рівнях потужності, поки не стабілізується робота електричної дуги, а потім переходять на більш високі рівні. В ході обробки з метою гомогенізації розплаву його перемішують аргонном, який подають через продувний блок в днищі ковша.

Нагрівання розплаву на УКП повинно проводитися до такої температури, яка дозволить компенсувати теплові витрати під час наступних технологічних операцій та забезпечити необхідний температурний діапазон перед розливанням з метою забезпечення сприятливих умов формування якісної структури зливку при мінімальній витраті електричної енергії. Таким чином, температура розплаву – один з найбільш важливих технологічних параметрів, котрий контролюється під час обробки сталі на УКП. Дослідження показали, що далеко не завжди при обробці забезпечуються режими ефективного нагрівання розплаву, що гарантовані поставачальниками установок за контрактом. Причиною цього є значне відхилення значень вхідних параметрів процесу (товщини шлакового покриву, маси розплаву, температури футеровки ковша, витрат аргону, початкової температури розплаву). Температура розплаву контролюється шляхом проміжних вимірів термопарами, виконання яких можливе лише при відключенні установки, що призводить до збільшення тривалості обробки, втрат тепла і зниження енергетичного і теплового к.к.д. установки. Тому необхідно для прогнозування температури розплаву розробити математичну модель, яка, з одного боку, досить точно прогнозувала динаміку температури розплаву, а з іншого (для спрощення її інтеграції в АСУ), описувалася б досить простими аналітичними виразами з мінімумом вхідних параметрів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Проблемам математичного моделювання теплоенергетичних процесів в агрегатах позапічної обробки сталі присвячені роботи [1-5]: Розроблена комплексна модель теплообмінних процесів в об'ємі сталі з урахуванням її перемішування, в стінці і склепінні ковшу, що охолоджується водою, з урахуванням екранування дуги шлаком, яка дозволяє враховувати вплив режимів роботи УПК на втрати тепла, а також розроблені рекомендації для оптимізації управління тепловим і електричним режимами УПК [1]; Розглянуто вплив газонаповненості розплаву під час

продування і температури газів під кришкою УПК на середню температуру розплаву, що рафінується [2]; досліджено ефективність перетворення електричної енергії, визначений енергетичний к.к.д. УПК при нагріванні розплаву і її тепловий баланс з урахуванням технологічних зупинок і нестаціонарності початкових умов теплопередачі всередині футерування ковша перед обробкою [3]; Представлені результати чисельного дослідження теп-лового стану металевої ванни місткістю 350 т УПК з трансформатором потужністю 45 МВ·А, зіставлені варіанти нагріву розплаву при продуванні аргонном з використанням одно-, дво- і трьохфурменого компонування донного блоку для продування [4]; Розроблено алгоритм оптимального управління відновним періодом плавки в дугових сталеплавильних печах і технологічних комплексах піч-ківш, що забезпечує стабільність якості виплавленої сталі при мінімальних енергетичних витратах [5]. Врахування впливу шлакового режиму на ефективність електродугового нагрівання розплаву, голістичного підходу при аналізі всіх факторів (товщини шлакового покриву, маси розплаву, температури футеровки ковша, витрат аргону, початкової температури розплаву), які впливають на тепловий баланс УКП, отримання досить простих аналітичних виразів, які з високою точністю описують динаміку температури розплаву дозволять доповнити існуючі дослідження.

Мета і завдання досліджень. Метою досліджень є розробка теплофізичної моделі динаміки теплового стану розплаву в агрегаті ківш-піч ємністю 100 т, розрахунок динаміки теплового стану розплаву з використанням балансових рівнянь, оцінка статей енергетичного балансу агрегату ківш-піч.

Структура динамічної моделі. Установка ківш-піч є складним теплофізичним об'єктом зі змінними станами. Змінність станів моделі обумовлена тим, що періоди нагрівання металу чергуються з періодичними зупинками вимірювання температури розплаву. Підвищення температури розплаву залежить від потужності і теплових втрат, що підводиться електричними дугами, внаслідок теплопередачі через футерування ковша, випромінювання з поверхні шлако-металевого розплаву, розплавлення легуючих і шлакоутворюючих матеріалів, продування аргонном. Так як з метою гомогенізації розплаву по ходу обробки проводиться продування аргонном, при подальших теплофізичних розрахунках приймаємо припущення, що розплав однорідний за температурою та хімічним складом [3].

Розроблена динамічна модель теплоенергетичних процесів в УКП (рис. 1) включає підсистеми: «Дуга», «Добавки», «Поверхня», «Стінки», «Днище», в яких оцінюються основні статті енергобалансу установки.

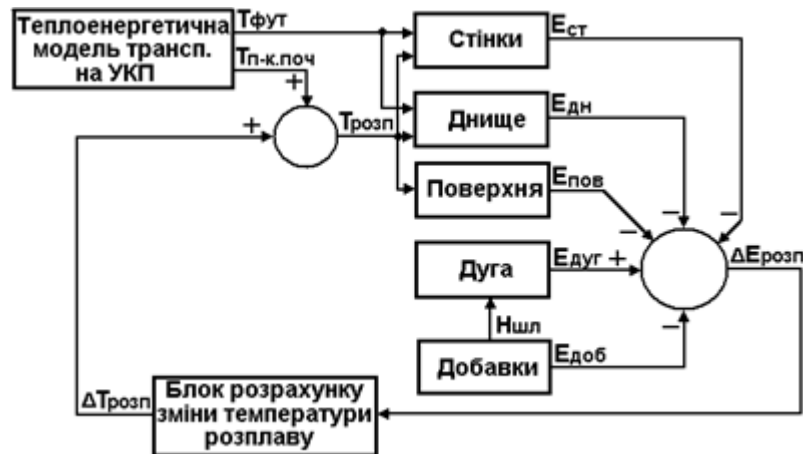


Рис. 1. Структурна схема динамічної моделі теплових процесів в агрегаті ківш-піч

В даних підсистемах оцінюються основні статті енергетичного балансу установки. При заданих параметрах: початковій температурі сталі перед обробкою на установці $T_{п-к.п.оч}$, температурі футеровки ковша $T_{фут}$, масі та теплоємності

розплаву за допомогою цієї моделі визначається зміна енергії металу та його температура $T_{розп}$.

Моделювання і аналіз результатів. В підсистемі «Дуга» енергія електричних дуг установки, що надходить на нагрівання розплаву, визначається з виразу

$$E_{дуг} = K \cdot \sqrt{3} \cdot U_{2,j} \cdot I_{2,j} \cdot \cos \varphi_j \cdot \eta_{ел} \cdot t_{нагр}, \quad (1)$$

де $K = 0,1 \dots 1$ – коефіцієнт, що враховує втрати потужності дуг на опромінення стінок ковша та склепіння установки в залежності від товщини шлакового покриву; $U_{2,j}$, $I_{2,j}$ – відповідно номінальні напруги і струми на вторинній обмотці трифазного трансформатора j -ого ступеня напруги; $\cos \varphi_j$ – коефіцієнт потужності трансформатора ступеня напруги j ; $\eta_{ел} = 0,9$ – електричний к.к.д. установки; $t_{нагр}$ – час нагрівання металу.

При визначенні коефіцієнта K необхідно врахувати три основні періоди стану поверхні шлакометалевого розплаву: початковий період формування шлакового покриву, період наростання товщини шлакового покриву в міру введення нових порцій шлакоутворюючих і розкислювачів, період

роботи дуг при їх повному екрануванні шлаком. У міру наростання шлакового покриву коефіцієнт змінюється в діапазоні від 0,1 до 1.

У підсистемах моделі «Добавки», «Поверхня», «Стінки», «Днище» проводиться визначення енергетичних втрат розплавом внаслідок нагрівання, розплавлення введених шлакоутворюючих та легуючих матеріалів, втрат через межу розплавленого шлаку, теплопередачі через футерування ковша. Введення хімічних добавок призводить до суттєвого зниження температури розплаву, сприяючи при цьому підвищенню ефективності нагрівання електричними дугами. За результатами аналізу літературних джерел, для оцінки витрат енергії (кДж) на нагрівання та розплавлення шлакоутворюючих, легуючих добавок, розкислювачів (підсистема «Добавки») нами запропоновано лінійну модель [3].

$$E_{доб} = 2095 \cdot m_{CaO} + 1676 \cdot m_{CaF_2} + 1680 \cdot m_{SiMn} - 419 \cdot m_{FeSi} + 1341 \cdot m_{FeMn} + 4190 \cdot m_c, \quad (2)$$

де m_i – маса добавки, що вводиться у сталь, кг.

Введення добавок спричиняє зниження температури розплаву, але підвищує ефективність нагрівання електричними дугами внаслідок збільшення товщини шлакового покриву. На товщину шлакового покриву впливає кількість та вид

матеріалів, які присаджуються у розплав, а також інтенсивність продувки інертним газом. За результатами проведених промислових експериментів для ковша ємністю 100 т при штатній питомій витраті аргону 1,5 л/хв·т отримано вираз, який дозволяє визначити товщину шлакового покриву

$$H_{шл} = 0,16 \cdot (m_{CaO} + m_{CaF_2}) + 0,11 \cdot m_{FeSi65} + 0,03 \cdot m_{SiMn17}, \quad (3)$$

де $H_{шл}$ – товщина шлакового покриву, мм;

m_i – маса матеріалу, що вводиться, кг.

При визначенні теплових втрат через футерування ковша, що складається з декількох шарів вогнетривких матеріалів (робочий шар, шар підробочий, шар теплоізоляції), розглядався процес нестационарної теплопередачі. Вважали, що стінки ковша є циліндром, а днище ковша – плоскою

$$c_m(T_m) \cdot \rho_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial r} \right) \quad \text{для стінки,} \quad (3)$$

$$c_m(T_m) \cdot \rho_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_m(T_m) \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) \quad \text{для днища,}$$

де r – радіус ковша; z – координата висоти розплаву; $c_m(T_m)$ – питома теплоємність матеріалу m футерівки; T_m – температура матеріалу m футерівки; ρ_m – густина матеріалу m футерівки; $\lambda_m(T_m)$ – теплопровідність матеріалу m футерівки.

Для межі розплав – футеровка та на зовнішній поверхні ковша задавали граничні умови 3-го роду

$$-\lambda_p(T_p) \cdot \left(\frac{\partial T_p}{\partial n} \right)_{n_{p,0}} = \alpha_{розп} \cdot (T_{розп} - T_{p,0}), \quad (4)$$

де $T_{розп}$ – температура розплаву; $T_{p,0}$ – температура внутрішньої поверхні робочого шару футерівки; $\alpha_{розп}$ – коефіцієнт тепловіддачі розплаву, Вт/м²·К.

На межах шарів футеровки і на внутрішній поверхні корпусу ковша задавали граничні умови 4-ого роду.

$$\left. \begin{aligned} T_{np,0} &= T_{p,1}; & T_{iz,0} &= T_{np,1} \\ \lambda_{p,\phi}(T_{p,\phi}) \cdot \left(\frac{\partial T_{p,\phi}}{\partial n} \right)_{n_{p,\phi,1}} &= \lambda_{np}(T_{np}) \cdot \left(\frac{\partial T_{np}}{\partial n} \right)_{n_{np,0}}; \\ \lambda_{np,вн}(T_{np}) \cdot \left(\frac{\partial T_{np}}{\partial n} \right)_{n_{np,1}} &= \lambda_{iz}(T_{iz}) \cdot \left(\frac{\partial T_{iz}}{\partial n} \right)_{n_{iz,0}}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де $T_{p,1}$ – температура внутрішньої поверхні робочого шару футерівки; $T_{np,0}$ – температура внутрішньої поверхні підробочого шару футерівки; $T_{np,1}$ – температура зовнішньої поверхні підробочого шару шамотної футерівки; $T_{iz,0}$ – температура внутрішньої поверхні теплоізоляційного шару; $T_{iz,1}$ – температура зовнішньої поверхні

шару ізоляції; $\lambda_m \cdot \left(\frac{\partial T_m}{\partial n} \right)_{n_m}$ – теплові потоки, що проходять через поверхні дотику відповідних шарів.

З огляду на те, що в металевому кожусі ковша градієнт температури невеликий, при теплопередачі він не враховується. Тому для зовнішньої поверхні ковша граничні умови третього роду задаються наступним чином:

$$\lambda_{iz,\phi} \cdot \left(\frac{\partial T_{iz,\phi}}{\partial x} \right) = -\alpha_{навк} \cdot (T_{iz,1} - T_{навк}), \quad (6)$$

де $\alpha_{окр}$ – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище, $T_{из,1}$ – температура зовнішньої поверхні теплоізоляційного шару,

$T_{окр}$ – температура навколишнього середовища.

Складність оцінки теплових втрат на нагрівання футерування ковша та теплопередачі через неї полягає в тому, що початкові умови для

вирішення рівнянь (3) з граничними умовами (4-6) невідомі. Тому додатково розглядалися теплофізичні процеси в період між випуском і нагріванням розплаву на установці ківш-піч: теплопередача через футерування ковша (приймалося припущення про стаціонарність початкових умов усередині футерування ковша на момент випуску розплаву в ківш) і випромінювання з поверхні системи розплав-шлак. Розрахунок теплового стану футерування ковша виконувався методом кінцевих різниць.

$$Q_{p-ш.т} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{p-ш-кр} \cdot (T_{розп.т}^4 - T_{кр}^4) F_{p-ш}, \quad (7)$$

де $Q_{p-ш.т}$ тепловий потік з поверхні метал-шлак в т-у хвилину обробки сталі на УКП; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – константа випромінювання абсолютно чорного тіла; $\varepsilon_{p-ш-кр}$ – ступінь чорноти системи, що включає в себе поверхню розплав-шлак і кришку установки, яка охолоджується водою; $T_{розп.т}$ – температура розплаву в т-у хвилину обробки на УКП; $T_{кр}$ – температура кришки, що охолоджується водою; $F_{p-ш}$ – площа вкритої шлаком поверхні.

$$Q_{відкр.т} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{розп-кр} \cdot (T_{розп.т}^4 - T_{кр}^4) F_{відкр}, \quad (8)$$

де $Q_{відкр.т}$ тепловий потік з відкритої поверхні розплаву в т-у хвилину обробки сталі на ковші-печі; $\varepsilon_{розп-кр}$ – ступінь чорноти системи розплав-водоохолоджувальна кришка; $F_{відкр}$ – площа відкритої поверхні розплаву.

Для визначення площі відкритої поверхні розплаву, що утворюється внаслідок продування інертним газом, авторами [7] проведено серію промислових експериментів на установці «ківш-піч» ємністю 100 т і встановлено залежність, яку в нашому випадку можна представити у вигляді лінійного рівняння:

$$\frac{F_{відкр}}{F_{повн}} = 0,1 \cdot Q_{Ar} - 0,09, \quad (9)$$

де $F_{відкр}/F_{повн}$ – частка відкритої поверхні, %, Q_{Ar} – питомі витрати аргону, л/хв·т.

Модель адаптована під УКП, яка має наступні технологічні параметри $U_{2,j} = 205 \dots 300$ В, $I_{2,j} = 27 \dots 31$ кА, активна потужність $P_{акт} = 4,9 \dots 10,8$ МВт, довжина електричної дуги 25-95 мм.

При оцінці теплових втрат з поверхні розплаву необхідно враховувати, що частина енергії втрачається випромінюванням з поверхні, покритої шлаком, а частина з відкритої поверхні розплаву, яка утворюється завдяки потокам аргону, що сходять. Площа відкритої поверхні залежить від інтенсивності продування інертним газом. Повний тепловий потік випромінюванням з поверхні розплаву, покритої шлаком, визначається виразом

Під час технологічних зупинок при оцінці теплових втрат з поверхні розплаву, покритого шлаком, необхідно враховувати зменшення втрат внаслідок затвердіння шлакового покриву. Тому при оцінці теплових втрат випромінюванням з поверхні розплав-шлак приймали припущення, що ступінь чорноти $\varepsilon_{p-ш-кр.2}$ змінюється за виразом $\varepsilon_{p-ш-кр.2} = a \cdot (\tau + 1)^b$, емпіричні коефіцієнти якого отримані під час адаптації моделі.

Повний тепловий потік з відкритої поверхні розплаву визначається виразом

В якості параметрів, які підлаштовувалися в моделі, враховувалися, коефіцієнт тепловіддачі сталі $\alpha_{розп}$, ступеня чорноти $\varepsilon_{p-ш-кр}$, $\varepsilon_{p-ш-кр.2}$, $\varepsilon_{розп-кр}$. Основною метою адаптації моделі є мінімізація суми квадратів різниць між реальними та модельними значеннями зміни температури розплаву. У результаті зіставлення теплофізичних розрахунків з результатами промислових експериментів отримано наступні величини теплофізичних параметрів $\alpha_{розп} = 1095$ Вт/м²·К, ступеня чорноти $\varepsilon_{p-ш-кр} = 0,59$, $\varepsilon_{p-ш-кр.2} = 0,59 \cdot (\tau + 1)^{0,45}$, $\varepsilon_{розп-кр} = 0,82$. Максимальне відхилення температури між модельними та експериментальними даними не перевищує $\pm 5^\circ$, тобто перебуває у межах точності вимірювальних приладів (рис. 2).

Результати розрахунків швидкості нагрівання розплаву під час роботи на різних ступенях напруги трансформатора за умови забезпечення повного екранування електричних дуг представлені в табл. 1. Отримані коефіцієнти не враховують введення легуючих і шлакоутворюючих матеріалів, і навіть технологічні зупинки, оскільки вплив цих чинників зміну теплового стану розплаву кожної плавки має визначатися індивідуально.

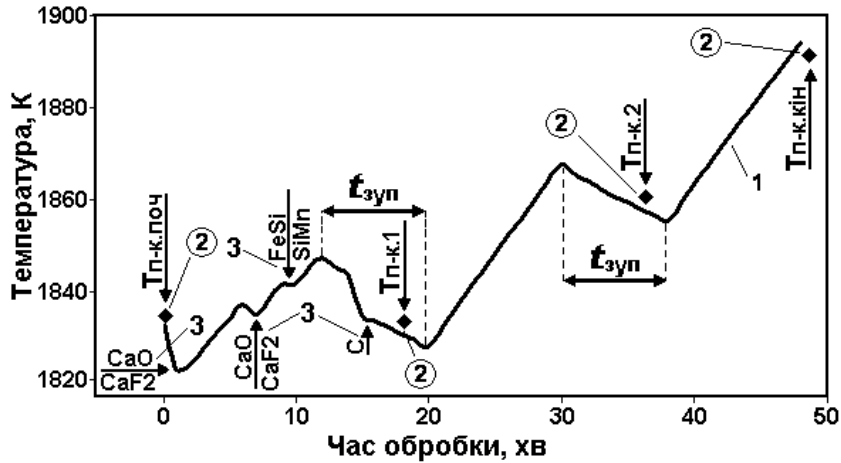


Рис. 2. Зміна температури сталі під час обробки: 1-модельні значення, 2-результати контролю термopарамі, 3- введення добавок

Таблиця 1. Швидкість нагрівання сталі в ковші залежно від потужності, що підводиться.

Ступінь напруги	$I_{2,j}$, кА	$U_{2,j}$, В	$P_{акт}$, МВт	$\Delta T_{розп}$, град/хв
1	31	205	4,9	-0,05...1,08
2	31	222	5,7	0,20...1,53
3	31	241	6,7	0,73...2,16
4	31	265	8,0	1,38...2,94
5	29	280	9,4	2,15...3,88
6	27	300	10,8	2,63...4,45

Збільшення температури розплаву під час нагрівання добре описується рівнянням виду:

$$\Delta T_{розп} = k_1 \cdot t_{нагр}, \quad (10)$$

де k_1 – емпіричний коефіцієнт, що визначається з виразу

$$k_1 = a_{cm} \cdot H_{шл} + b_{cm} \cdot M_{розп} + c_{cm} \cdot Q_{Ar} + d_{cm} \cdot t_{вун} + e_{cm} \cdot T_{п-к.нач} + f_{cm} \cdot T_{фум.0} + g_{cm} \quad (11)$$

де $H_{шл}$ – товщина шлакового покриву, мм; $M_{розп}$ – маса розплаву, т; Q_{Ar} – питома витрата аргону, л/хв·т; $t_{вун}$ – час з моменту закінчення випуску сталі в ківш, хв; $a_{cm}, b_{cm}, c_{cm}, d_{cm}, e_{cm},$

f_{cm}, g_{cm} – коефіцієнти рівняння, що залежать від ступіней напруги трансформатора.

Зниження температури розплаву під час технологічних зупинок у загальному вигляді можна описати рівнянням виду

$$\Delta T_{розп} = k_2 \cdot t_{зуп} + k_3 \cdot \sqrt{t_{зуп}}, \quad (12)$$

де $t_{зуп}$ – час зупинки, хв, k_2 і k_3 – емпіричні коефіцієнти.

В результаті виконаних машинних експериментів на розробленій моделі отримані залежності емпіричних коефіцієнтів k_2 та k_3 від вхідних параметрів:

$$\left. \begin{aligned} k_2 &= a_1 \cdot T_{фум.0} + a_2 \cdot M_{розп} + a_3 \cdot Q_{Ar} + \\ &+ a_4 \cdot t_{вун} + a_5 \cdot T_{зуп.поч} + a_6 \\ k_3 &= b_1 \cdot T_{фум.0} + b_2 \cdot M_{розп} + b_3 \cdot Q_{Ar} + \\ &+ b_4 \cdot t_{вун} + b_5 \cdot T_{зуп.поч} + b_6 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

де $T_{зуп.поч}$ – температура сталі на початку технологічної зупинки, К.

Для того, щоб розробити рекомендації щодо процесу обробки необхідно оцінити статті енергетичного балансу установки ківш-під. На рис. 3

наведено дані про енергетичний баланс установки при роботі на ступені напруги $U_{2,j} = 300$ В.

На рис. 4. представлений діапазон зміни енергетичної та теплової коефіцієнтів корисної дії для ступенів напруги трансформатора з урахуванням теплових втрат під час проміжних зупинок.

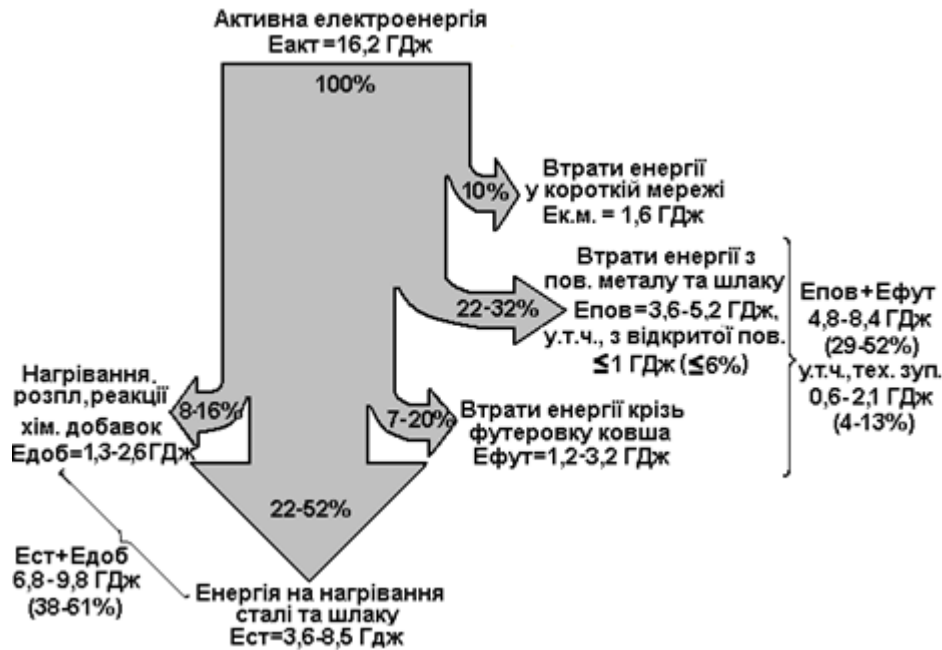
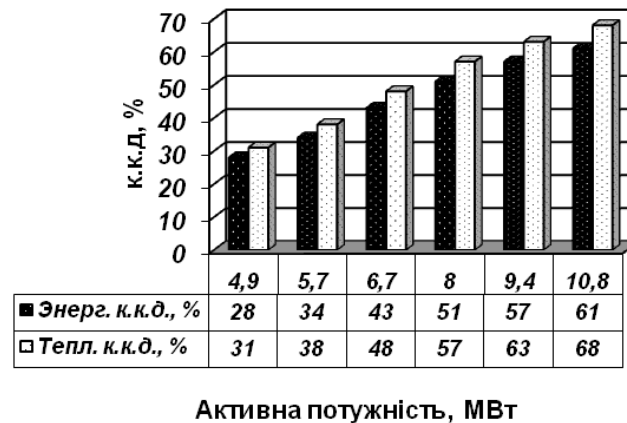
Рис. 3. Енергетичний баланс УКП при $I_{2,j} = 27,8$ кА, $U_{2,j} = 300$ В, $P_{акт} = 10,8$ МВт

Рис. 4. Швидкість нагрівання металу (а), максимальний енергетичний і тепловий к.к.д. (б) в залежності від активної електричної потужності УКП

Виконаний аналіз статей енергетичного балансу УКП (рис. 3) показав, що існує можливість підвищити енергетичний к.к.д. на 4..13% за рахунок виключення технологічних зупинок під час обробки, які пов'язані з проміжними вимірами температури металу

Висновки

Розроблено динамічну модель теплових процесів в агрегаті ківш-піч, у якій на відміну від отриманих раніше теплофізичних моделей враховано наявність відкритої поверхні металу, площа якої залежить від інтенсивності продування інертним газом, а також нестационарність початкових умов усередині футерування ковша. Враховані додаткові фактори дозволяють прогнозувати температуру розплаву під час обробки з точністю $\pm 5^\circ$, що відповідає точності термомпарі.

Модель адаптована до реальних промислових умов. Отримані аналітичні вирази зміни температури розплаву дозволяють інтегрувати розроблену модель існуючих АСУ позапічної обробки сталі.

Аналіз статей енергетичного балансу установки показує, що існують резерви підвищення енергетичного і теплового к.к.д. установки:

скорочення по можливості технологічних зупинок (у разі, якщо такі зупинки необхідні з точки зору технології, то витрата аргону має бути меншою, щоб не утворювалася відкрита поверхня металу; перемикання ступенів напруги з низьких на вищі повинно здійснюватися в міру збільшення товщини шлакового покриву, щоб уникнути втрат енергії дугами на опромінення стінок ковша.

Перелік посилань

1. Ryabchikova E.S. Mathematical providing for the model of heat exchange processes of the ladle furnace unit/ E.S. Ryabchikova, M.Y. Ryabchikov // Theory and technology of metallurgical production - 2013, №1 (13) - p. 29-31.
2. Mathematical modeling of the thermal regime of a ladle furnace with bubble gas blowing. Communication IV. Report IV / S.A. Novokrechenov, V.S. Shvidkiy, V.P. Zhukov, D.D. Cheremisin // News of the high educational institutions. Non-ferrous metallurgy – 2016, № 1. - p. 72-78.
3. Zhadanos O.V. Dynamic model of heat engineering processes in electrical arc ladle-furnace plant to develop automated control system / O.V. Zhadanos, I.V. Derevyanko, D.O. Chaika // Proceedings of 9th international conference of young scientists on welding and related technologies, 23-26 May 2017, Kiev, Ukraine. – p. 72-76.
4. Studying of the thermal state of the bath of the ladle furnace installation / V.P. Piptuk, V.F. Polyakov, S.E. Samokhvalov, O.B. Isaev, S.N. Pvlo, A.A. Travinchev // Metallurg – 2011, № 7. - p. 50-53.
5. Razhivin A.V. Optimization of the thermal regime of melting in technological complexes “furnace-ladle” / A.V. Razhivin // Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: Computing equipment and automation - 2010., № 18 (169). - p. 78-83.
6. W. Hoppmann, F.N. Fett, T. Klages, L. Fiege. Energiehaushalt eines Pfannenofens // Stahl und Eisen. - Band (108) 5. September 1988. - № 18. - p. 841-847.
7. Beitsun S.V., Zhadanos O.V., Michailovky N.V. Effect of initial melt and ladle lining temperatures on heat losses during secondary steel processing // Metallurgical heat engineering. - NMAU. - 2004. - s. 27-34.

References

1. Ryabchikova, E. S., & Ryabchikov, M. Y. (2013). Mathematical providing for the model of heat exchange processes of the ladle furnace unit. *Theory and technology of metallurgical production*, (1)(13), 29-31
2. Novokrechenov, S. A., Shvidkiy, V. S., Zhukov, V. P., & Cheremisin, D. D. (2016). Mathematical modeling of the thermal regime of a ladle furnace with bubble gas blowing. Communication IV. Report IV. *News of the high educational institutions. Non-ferrous metallurgy*, (1), 72-78
3. Zhadanos, O. V. Derevyanko, I. V., & Chaika, D. O. (2017). Dynamic model of heat engineering processes in electrical arc ladle-furnace plant to develop automated control system. In *Proceedings of 9th international conference of young scientists on welding and related technologies*, 23-26 May 2017, Kiev, Ukraine, 72-76
4. Piptuk, V. P., Polyakov, V. F., Samokhvalov, S. E., Isaev, O. B., Pvlo, S. N., & Travinchev, A. A. (2011). Studying of the thermal state of the bath of the ladle furnace installation. *Metallurg*, (7), 50-53
5. Razhivin, A. V. (2010). Optimization of the thermal regime of melting in technological complexes “furnace-ladle”. *Proceedings of Donetsk National Technical University. Series: Computing equipment and automation*, (18(169)), 78-83
6. Hoppmann, W., Fett, F. N., Klages, T., & Fiege, L. (1988). Energiehaushalt eines Pfannenofens. *Stahl und Eisen*, 108(18), 841-847
7. Beitsun, S. V., Zhadanos, O. V., & Michailovky, N. V. (2004). Effect of initial melt and ladle lining temperatures on heat losses during secondary steel processing. *Metallurgical heat engineering*, 27-34

Надійшла до редколегії / Received by the editorial board: 06.05.2024

Прийнята до друку / Accepted for publication: 20.08.2024