

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В УСТАНОВЦІ КІВШ-ПІЧ ТА ЇЇ ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Позапічної обробки є невід'ємною частиною виробництва якісної сталі. Вона дозволяє виробнику бути конкурентоспроможним на світовому ринку сталі. Вивчення способів підвищення ефективності і якості позапічної обробки є актуальною задачею на сьогоднішній день в умовах жорсткої економії енергоресурсів і конкуренції на світовому ринку сталі. Одним з основних агрегатів позапічної обробки сталі є установка ківш-піч (УКП), в якій здійснюється доведення рідкої сталі до заданого хімічного складу і температури.

Установка ківш-піч споживає велику кількість електроенергії на електродугової нагрів металу з метою доведення сталі у ківші до заданої температури. Економія даного ресурсу в сукупності зі зменшенням витрат часу на «зайвий» нагрів металу дозволить зменшити собівартість продукції підприємства.

У даній роботі запропоновано і реалізовано динамічна модель теплофізичних процесів в сучасній установці ківш-піч. Вона заснована на тепловому балансі енергії, яка витрачається на нагрів металу електричною дугою і втратами енергії в ході технологічного процесу. Кількість тепла $\Delta Q_{\text{розп}}(\tau)$, яка вноситься в розплав металу за певний проміжок часу $\Delta\tau$, визначається різницею між кількістю тепла, яка виділяється електричною дугою $Q_{\text{дуг}}(\Delta\tau)$ і існуючими втратами тепла ківшом з розплавом за цей же період. Основними складовими втрат тепла є – втрати через поверхню розплаву в ківші $Q_{\text{пов}}(\Delta\tau)$, втрати через корпус ківшу $Q_{\text{корп}}(\Delta\tau)$ і втрати на нагрів добавок $Q_{\text{доб}}$, які подаються в ківш. Модель програмно реалізована у вигляді підсистеми «Електричний підігрів розплаву» в системі керування агрегатом «ківш-піч».

Запропонована підсистема дозволяє визначити необхідну кількість електроенергії на нагрів металу до заданої температури, розрахувати час нагріву і, таким чином, усунути втрати часу на «перегрів» металу.

Ключові слова: *Установка ківш-піч, позапічна обробка сталі, електродуговий нагрів сталі, тепловий баланс, динамічна математична модель.*

Постановка проблеми

В даний момент час нагріву сталі в установці ківш-піч (УКП) розраховується по статичним моделям і не дозволяє врахувати багато чинників в процесі нагріву. Окрім того, температура металу в процесі нагріву контролюється лише періодично дорогим обладнанням, тому часто часу на нагрів металу витрачається більше необхідно. Відповідно це веде до використання надмірної кількості електроенергії і, як результат, до збільшення собівартості сталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В роботі [1] була розроблена модель теплового балансу УКП в середовищі Simulink-12, яка здатна оцінювати динамічні характеристики роботи конкретного УКП. Адекватність моделі підтверджена на 10 контрольних плавках, які показали неточність оцінки поточної температури не більше 5 °С. Модель може бути використана як порадник оператора в умовах часових обмежень на плавку і дозволяє рекомендувати мінімальне значення потужності, необхідне для отримання заданої на виході температури.

Машинобудування і зварювальне виробництво

На основі обробки дослідних даних отриманих в ході експериментальних досліджень в роботі [2] вивчені основні статті енергетичного балансу при різних технологічних параметрах позапічної обробки сталі. Розроблені алгоритм і програма розрахунку теплових потоків в робочому просторі УКП під час позапічної обробки металу.

В роботі [3] вирішено актуальне наукове завдання, яке полягає в розробці енерго-економічного режиму роботи установки ківш-піч (УКП), що дозволяє удосконалити технологію позапічної обробки сталі і забезпечити регламентовану технологічними вимогами температуру металу перед розливанням.

Мета дослідження.

Розробити модель теплофізичних процесів в установці ківш-піч, яка дозволить визначати поточну температуру розплаву і момент часу коли вона досягне заданої величини, з урахуванням основних втрат тепла і тепла, витраченого електричною дугою на нагрів.

Основний матеріал дослідження

З початком обробки ківшу в УКП розплав втрачає тепло і його температура знижується. Для досягнення, після обробки плавки, заданої температури безперервного розливу, розплав у ківші підігрівають електричною дугою. Причому час підігріву попередньо невідомий, оскільки невідома кількість тепла, яку треба ввести, щоб досягнути задану температуру розплаву. Ця кількість тепла $\Delta Q_{\text{розп}}$, яка вноситься в розплав металу за певний проміжок часу Δt , визначається різницею між кількістю тепла, яка виділяється електричною дугою $Q_{\text{дуг}}(\Delta t)$ і існуючими втратами тепла ківшом з розплавом за цей же період. Основними складовими втрат тепла є – втрати через поверхню розплаву в ківші $Q_{\text{пов}}(\Delta t)$, втрати через корпус ківшу $Q_{\text{корп}}(\Delta t)$ і втрати на нагрів добавок $Q_{\text{доб}}$, які подаються в ківш. Таким чином, тепло на нагрів розплаву визначається балансовим рівнянням:

$$\Delta Q_{\text{розп}}(\Delta t) = Q_{\text{дуг}}(\Delta t) - Q_{\text{пов}}(\Delta t) - Q_{\text{корп}}(\Delta t) - Q_{\text{доб}}; \quad (1)$$

Втрати тепла при продувці ківшу з розплавом аргоном у рівнянні (1) не враховуються, оскільки витрати аргону на продувку незначні (~ 50 мЗ).

Рівняння (1) є основою моделі теплофізичних процесів в агрегаті ківш-піч. Для вирішення цього рівняння необхідно за кожний проміжок часу Δt визначати його складові. Так кількість тепла, яка виділяється електричною дугою $Q_{\text{дуг}}$ за час Δt буде дорівнювати:

$$Q_{\text{дуг}}(\tau) = K \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta_{\text{ел}} \cdot \Delta t; \quad \text{Дж} \quad (2)$$

де K – коефіцієнт втрат тепла на нагрів конструктивних елементів агрегату ківш-піч;

U – напруга живлення на вторинній обмотці трансформатора [В];

I – величина струму на вторинній обмотці трансформатора [А];

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності;

$\eta_{\text{ел}}$ – ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу нагріву, який визначається співвідношенням кількості тепла, яке передане дугою розплаву, до теплового еквіваленту електричної потужності дуги.

ККД процесу знаходиться експериментально в процесі роботи моделі. Він залежить від довжини дуги і її заглиблення у розплав. Втрати тепла через поверхню розплаву у ківші визначаємо згідно формули:

$$Q_{\text{пов}}(\tau) = y_0 \cdot e_{\text{рш-кр}} \cdot (T_{\text{розпл}}^4 - T_{\text{кр}}^4) \cdot F_{\text{рш}} \Delta t; \text{Дж} \quad (3)$$

Машинобудування і зварювальне виробництво

де $Q_{\text{пов}}$ – кількість втраченої енергії з поверхні металу;
 U_0 - константа випромінювання абсолютно чорного тіла, $\text{Вт/м}^2\text{°K}^4$;
 $e_{\text{рш-кр}}$ - ступінь чорноти системи, яка включає в себе поверхню розплав-шлак і водоохолоджувану кришку установки;
 $T_{\text{розп}}$ - температура розплаву $^{\circ}\text{K}$;
 $T_{\text{кр}}$ - температура водо охолодженої кришки $^{\circ}\text{K}$;;
 $F_{\text{рш}}$ - площа поверхні розплаву у ківші м^2 .

Враховуючі те, що в період електричного нагріву дуга закрита шлаком і в цей період іде продувка аргоном, яка осереднює температуру металу у ківші, то можна прийняти, що температура шлаку в цей період дорівнює температурі металу у ківші. Випромінювання тепла йде з поверхні шлаку, тому у виразі (3), тому приймаємо, що $T_{\text{розп}} = T_{\text{шл}}$.

При визначенні теплових втрат через корпус і футеровку ківшу, що складається з декількох шарів вогнетривких матеріалів, розглядався процес нестационарної теплопередачі. Приймаючи, що ківш має форму циліндру, запишемо рівняння для кількості тепла, яке втрачається через корпус ківшу у вигляді:

$$Q_{\text{корп}}(\tau) = \frac{\pi(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^n R_i} \Delta\tau, \text{ Дж} \quad (4)$$

де T_1 - температура металу в ківші, $^{\circ}\text{C}$;
 T_2 - температура повітря зовні ківшу, $^{\circ}\text{C}$;
 R_i - термічний опір теплопередачі i -того шару футеровки, $^{\circ}\text{C/Вт}$.

Теплота, яка витрачається на нагрів добавок, визначається згідно формули:

$$Q_{\text{доб}} = (T_{\text{розп}} - T_{\text{доб}}) \cdot (m_{\text{доб}} * \frac{C_{\text{р,доб}}}{M_{\text{доб}}}), \text{ Дж} \quad (5)$$

де $T_{\text{доб}}$ - температура добавки перед завантаженням в розплав, $^{\circ}\text{K}$;
 $m_{\text{доб}}$ - маса добавки, г;
 $C_{\text{р,доб}}$ - стандартная мольная теплоемкость добавки из справочной литературы, $\text{Дж/(моль } ^{\circ}\text{K)}$;
 $M_{\text{доб}}$ – молярна маса добавки, г/моль .

Підставляючи у формулу (1) значення за певний проміжок часу $\Delta\tau$ її складових – формули (2), (3), (4), (5), знаходимо значення кількості тепла, яка внесена в розплав електричною дугою і яка пішла на підвищення його температури. Знаючи температуру розплаву до підігріву і кількість тепла витраченого на підігрів за час $\Delta\tau$, можемо в знайти поточну температури розплаву $T_{\text{розп}}$ на даний момент часу. При досягненні цієї температури заданої величини підігрів зупиняється.

Вище розглянута динамічна модель, структура якої представлена на рис. 1 була програмно реалізована у вигляді підсистеми «Електричний підігрів розплаву» в системі керування установкою ківш-піч.

Машинобудування і зварювальне виробництво

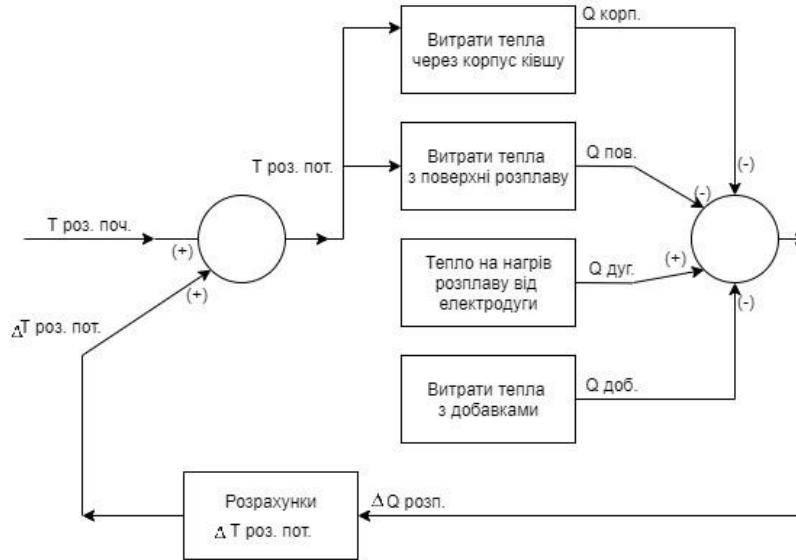


Рисунок 1 – Структурна схема динамічної моделі теплофізичних процесів в установці ківш-піч

Головний екран підсистеми представлений на рис. 2.

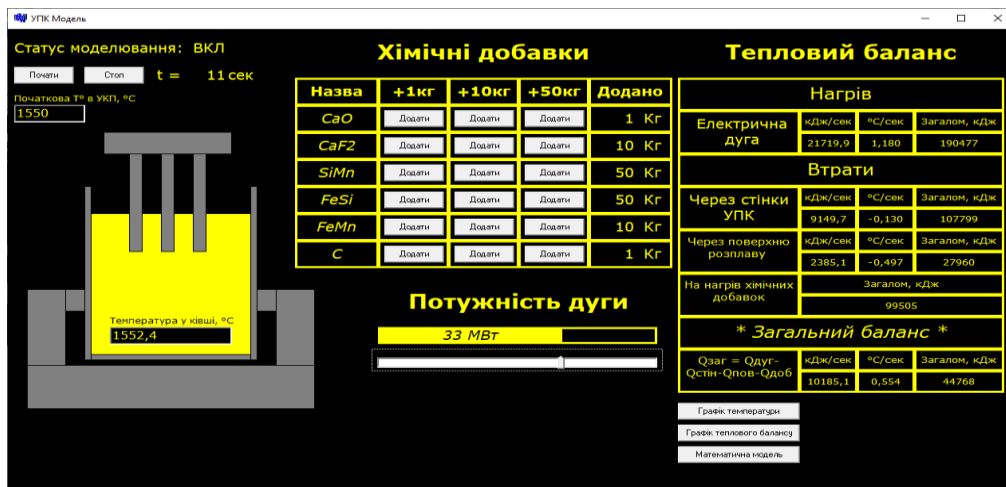


Рисунок 2 – Головний екран програми

На цьому екрані розташовані різні елементи управління (кнопки, поля введення даних, «повзунки»). У лівій частині знаходиться мнемосхема агрегату з відображенням поточної температури розплаву. Вище знаходиться поле введення початкової температури розплаву, яка буде використовуватися в моделі. Кнопки «Почати» і «Стоп» дозволяють починати процес моделювання і зупиняти його відповідно. Праворуч кнопок розташовано поле виведення часу з початку роботи математичної моделі.

У таблиці «Хімічні добавки» розташовані кнопки для додавання в розплав різних добавок. Після натискання на кнопку відбудеться відповідний розрахунок і зміниться поле виведення сумарної кількості введеної добавки в правому стовпчику таблиці.

Нижче розташовано поле управління потужністю електричної дуги. Переміщаючи повзунок можна змінювати поточну потужність в межах від 0 до 50 МВт.

Машинобудування і зварювальне виробництво

У правій частині головного екрану розташована таблиця теплового балансу. Тут можна побачити кількість теплоти, одержаної або витраченої за секунду часу в кДж, величину температура розплаву за секунду і сумарна кількість теплоти. Кнопка «Графік температури» відображає екран з графіком поточної температури розплаву в ківшу на установці ківш-піч (УКП) в часі (рис. 3).



Рисунок 3 – Графік температури розплаву в УКП

Кнопка «Графік теплового балансу» відображає екран з графіком теплоти, одержаної або витраченої за рахунок різних впливів у часі (рис. 4).

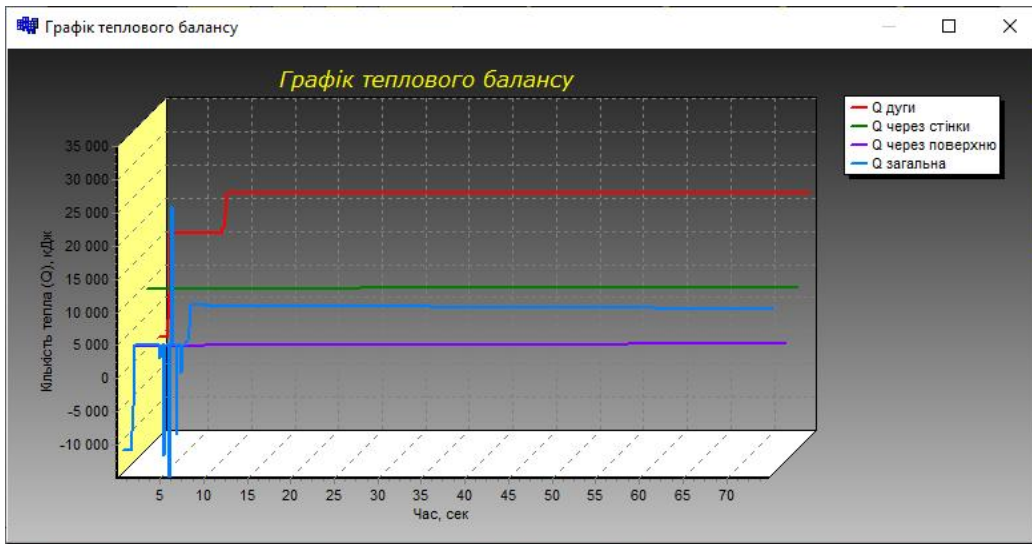


Рисунок 4 – Графік теплового балансу в УКП

Таким чином, підсистема дає змогу оператору установки ківш-піч оперативно контролювати процес підігріву і вчасно його зупиняти, що безперечно покращить економічні показники роботи УКП.

ВИСНОВКИ

Розглянуті основні джерела втрат тепла при електричному підігріву розплаву в установці ківш-піч і математичний опис їх зміни в часі.

На основі рівняння для кількості тепла $\Delta Q_{\text{розп}}$, яка вноситься дугою в розплав металу за певний проміжок часу, розроблена структурна схема динамічної моделі теплофізичних процесів в установці ківш-піч.

Програмна реалізація моделі виконана у вигляді підсистеми «Електричний підігрів розплаву» в системі керування установкою

Підсистема електричного підігріву дозволяє оператору контролювати процес підігріву і вчасно його зупинити.

Список використаних джерел:

1. Лемешко, М. О. Разработка рациональных режимов десульфурации стали в агрегате ковш-печь с использованием моделей нечеткой логики : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Лемешко Марина Александровна. – Магнитогорск, 2012. – 128 с.
2. Харламов, Д. А. Розробка енергозберігаючого режиму позапічної обробки стали в агрегаті ківш-піч / Д. А. Харламов // Тонкі Високі Технології. – 2007. – № 1. – С. 28.
3. Оптимизация управления энергетическим режимом электродугового агрегата ковш-печь методом динамического программирования / А. В. Жаданос [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность.– 2007. – N 5. – С. 37–42.

Кравченко В. П., Орлов О. А.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В УСТАНОВКЕ КОВШ-ПЕЧЬ И ЕЕ ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Внепечной обработки является неотъемлемой частью производства качественной стали. Она позволяет производителю быть конкурентоспособным на мировом рынке стали. Изучение способов повышения эффективности и качества внепечной обработки является актуальной задачей на сегодняшний день в условиях жесткой экономии энергоресурсов и конкуренции на мировом рынке стали. Одним из основных агрегатов внепечной обработки стали является установка ковш-печь (УКП), в которой осуществляется доведение жидкой стали до заданного химического состава и температуры.

Установка ковш-печь потребляет большое количество электроэнергии на электродуговой нагрев металла с целью доведения стали в ковше до заданной температуры. Экономия данного ресурса в совокупности с уменьшением затрат времени на «лишний» нагрев металла позволит уменьшить себестоимость продукции предприятия.

В данной работе предложена и реализована динамическая модель теплофизических процессов в современной установке ковш-печь. Она основана на тепловом балансе энергии, которая расходуется на нагрев металла электрической дугой и потерями энергии в ходе технологического процесса. Количество тепла $\Delta Q_{\text{розп}}(\tau)$, которое вносится в расплав металла за определенный промежуток времени Δt , определяется разницей между количеством тепла, которое выделяется электрической дугой $Q_{\text{дуг}}(\Delta t)$ и существующими потерями тепла ковшом с расплавом за этот же период. Основными составляющими потерь тепла являются – потери

Машинобудування і зварювальне виробництво

через поверхню расплава в ковше $Q_{\text{пов}}(\Delta\tau)$, потери через корпус ковша $Q_{\text{корп}}(\Delta\tau)$, и потери на нагрев добавок $Q_{\text{доб}}$, которые подаются в ковш.

Модель программно реализована в виде подсистемы «Электрический подогрев расплава» в системе управления установкой «ковш-печь». Предлагаемая подсистема позволяет определить необходимое количество электроэнергии на нагрев металла до заданной температуры, рассчитать время нагрева и, таким образом, устранить потери времени на «перегрев» металла.

Ключевые слова: Установка ковш-печь, внепечная обработка стали, электродуговой нагрев стали, тепловой баланс, динамическая математическая модель.

Kravchenko V. P., Orlov O. A.

DYNAMIC MODEL OF THERMAL PROCESSES IN THE BUCKET-FURNACE INSTALLATION AND ITS PROGRAMS IMPLEMENTATION

Out-of-furnace processing is an integral part of quality steel production. It allows the manufacturer to be competitive in the global steel market. The study of ways to improve the efficiency and quality of out-of-furnace treatment is an urgent task today in the context of tight energy savings and competition in the global steel market. One of the main units for out-of-furnace steel processing is a ladle-furnace unit, in which liquid steel is brought to a given chemical composition and temperature.

The ladle-furnace unit consumes a large amount of electricity for electric arc heating of the metal in order to bring the steel into the ladle to the specified temperature. Saving this resource, together with a decrease in the time spent on "unnecessary" heating of the metal, will reduce the cost of the production of the enterprise.

In this work, a dynamic model of thermophysical processes in a modern ladle-furnace installation is proposed and implemented. It is based on the heat balance of energy, which is spent on heating the metal with an electric arc and energy losses during the technological process.

The amount of heat ΔQ_{arc} , (τ), which is introduced into the metal melt for a certain period of time $\Delta\tau$, is determined by the difference between the amount of heat that is released by the electric arc $Q_{\text{arc}}(\Delta\tau)$ and the existing heat losses from the ladle with the melt during the same period. The main components of heat loss are - losses through the surface of the melt in the ladle $Q_{\text{пов}}(\Delta\tau)$, losses through the ladle body $Q_{\text{corp}}(\Delta\tau)$, and losses for heating the additives $Q_{\text{доб}}$, which are fed into the ladle.

The model is implemented in software as a subsystem "Electric heating of the melt" in the control system of the "ladle-furnace" installation. The proposed subsystem allows you to determine the required amount of electricity to heat the metal to a given temperature, to calculate the heating time and, thus, to eliminate the loss of time for "overheating" of the metal.

Keywords: Ladle-furnace installation, out-of-furnace steel treatment, electric arc heating of steel, heat balance, dynamic mathematical model.

Стаття надійшла 11.06.2021 р.