

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С. Богушевський, К.О. Сергеева

НТУУ «Київський політехнічний інститут»

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СТАЛІ У КОНВЕРТЕРІ

Досліджені методи вимірювання температури металу в конвертері: по температурі в двох точках футерівки, за температурою й опором футерівки та за струмом термоелектронної емісії.

Вступ. Температура металу в конвертері є одним із основних параметрів, що характеризують процес продувки. Важливість контролю цього параметра зросла в останій час при оснащенні конвертерних цехів установками безперервного литва заготовок.

Для контролю температури металу в процесі продувки запропонований ряд контактних [1, 2] методів. Однак складна реалізація цих методів та низька стійкість захисних наконечників термопар заважають їх широкому використанню в промислових умовах. Відомо багато безконтактних [3, 4] методів вимірювання. Але ці методи мають недостатню точність для використання їх в системі керування температурою металу.

Постановка задачі. Метою проведення досліджень є розробка методів безперервного контролю температури металу з підвищеною точністю.

Результати досліджень. Нами досліджено ряд пристроїв для виміру температури, що використовують розподілення температури у футерівці конвертера [5].

По температурі в двох точках футерівки. Із теорії нестационарної теплопровідності твердого тіла відомо, що при тепловому впливі спорідненим моментам часу для точок по товщині тіла, в яких контролюється температура, відповідають однакові значення критерія Фур'є. Інерційний час запізнювання температурного імпульсу по товщині футерівки визначається її геометричними та теплофізичними властивостями:

$$\Delta\tau_1 = X^2/a_{\text{ф}}, \quad (1)$$

де $\Delta\tau_1$ – проміжок часу від моменту різкої зміни температури в робочому просторі конвертера до початку зміни температури футерівки на глибині X , с.

Нехтуючи зміною теплофізичних властивостей вогнетривкого матеріалу для двох різновіддалених точок активного шару футерівки, можна записати:

$$\frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1} = \frac{(X+d)^2}{X^2}, \quad (2)$$

де $\Delta\tau_2$ – проміжок часу від моменту різкої зміни температури у робочому просторі конвертера до початку зміни температури футерівки на глибині $X+d$, с;

d – відстань між точками виміру температури, м.

Підставляючи у формулу (1) вираз через відношення інерційного часу координат згідно (2) та вирішуючи відносно $t|_{X=0}$, тобто температури металу, отримаємо в лінеаризованому вигляді:

$$t|_{X=0} = t_1 + \frac{t_1 - t_2}{\sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1} - 1}}. \quad (3)$$

Температуру прикордонного шару точок футерівки (рис. 1) вимірюють термопарами $I1$ та $I2$ в комплекті з блоками вимірювання температури I та 2 . Напруга, що пропорційна температурі, поступає на диференціатори 4 та 5 визначення моменту різкої зміни температурного режиму в точках, що контролюються. Вихідні напруження блоків 4 і 5 поступають в блоки 6 та 7 визначення проміжків часу між різкою зміною температурного режиму плавильного агрегату та зміною температур точок, що контролюються. В ці самі блоки поступає сигнал про різку зміну температурного режиму агрегату з блоку 3 (використовується фотореле, зв'язане на струмись металу, що зливається з конвертера, або виконавчі механізми зміни витрати дугтя, зміни положення фурми і введення сипких матеріалів).

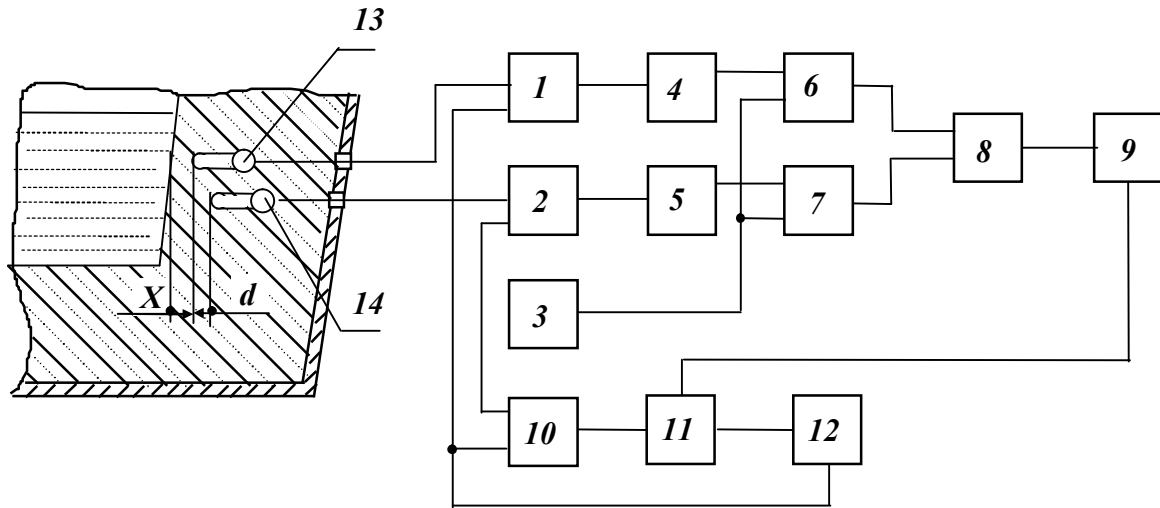


Рис. 1 Блок-схема пристрою контролю температури металу по розподіленню температури в футерівці: 1, 2 – блоки вимірювання температури; 3 – блок контролю різкої зміни температурного режиму агрегату; 4, 5 – диференціатори; 6, 7 – блоки визначення проміжків часу між різкою зміною температурного режиму плавильного агрегату та зміною температур точок, які контролюються; 8, 11 – блоки ділення; 9 – функціональний блок; 10, 12 – суматори; 13, 14 – термопари.

Вихідні напруги блоку 6 і 7, що пропорційні відповідно проміжкам часу τ_1 , та τ_2 , потрапляють в блок 8, ділення, в якому обчислюється відношення τ_1/τ_2 . Вихідна напруга блоку 8, потрапляє в функціональний блок 9, в якому обчислюється величина $\sqrt{\tau_2/\tau_1} - 1$. Напруги, що пропорційні температурі у вимірюваних точках футерівки, потрапляють з блоків 1 та 2 в суматор 10, вихідна напруга якого, пропорційна величині $t_1 - t_2$, поступає в блок ділення 11. З виходу блоку 11 знімається напруга, пропорційна величині $(t_1 - t_2)/(\sqrt{\tau_2/\tau_1} - 1)$, яка поступає в суматор 12, в який також поступає вихідна напруга блоку 1, що пропорційна температурі t_1 . В суматорі 12 визначається значення температури металу за формулою (3).

Похибка пристрою залежить від точності контролю проміжків часу реакції чутливих елементів термопар на температурне збурення у ванні. У випадку ошлаковування футерівки губиться інформативність сигналу, так як більш віддалений датчик температури часто взагалі не реагує на збурення в робочому просторі агрегату. Крім того, сам процес вимірювання часу реакції датчиків температури на збурення в цьому випадку викликає великі труднощі, адже контролювати швидкість параметрів, які повільно змінюються, з високою точністю практично неможливо.

За температурою й опором футерівки

Для контролю температури рідкої ванни з більш високою точністю розроблений пристрій (рис. 2). В цьому пристрої прикордонний шар футерівки на ділянці від датчика, що розміщений ближче до металеві ванни, виконують з вогнетривкого матеріалу з лінійною залежність електроопору від температури в діапазоні вимірюваних температур (1350...1550 °C) та додатково вимірюють електроопір вогнетривкого матеріалу.

Залежності, які покладені в основу пристрою:

$$t = t_1 + (t_1 - t_2)X/d;$$

$$R = [\rho_1 - k(t - t_1)/2]X, \quad (4)$$

де R – вимірюваний електроопір вогнетривкого матеріалу на ділянці від першого датчика температури до вогневої поверхні, Ом;

ρ_1 – питомий електроопір вогнетривкого матеріалу на ділянці при температурі t_1 , Ом/м;

k – коефіцієнт пропорційності, Ом/(м · °C);

Пристрій працює наступним чином:

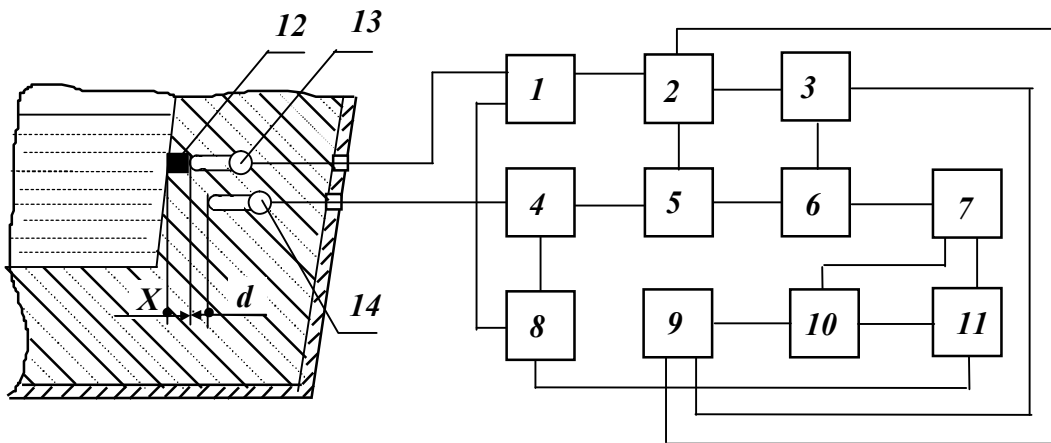


Рис. 2 Блок-схема пристрою контролю температури металу з вимірюванням електроопору вогнетривкого матеріалу: 1 – перемикач; 2, 4 – вимірювачі температури; 3, 5, 9, 11 – суматори; 6, 10 – блок множення; 7 – схеми балансування; 8 – блок контролю електроопору; 12 – вогнетривка вставка; 13, 14 – термопар.

У процесі продувки рідкого металу сигнали від датчиків 13 та 14 температури поступають відповідно на вимірювачі 2 (через перемикач 1, який знаходиться в першому положенні) та 4 (безпосередньо) температури. При переводі перемикача 1 в інше положення спай термопар закорочуються та передають інформацію про електроопір вогнетривкого матеріалу вставки 12 в блок 8 контролю електроопору. Перевод перемикача з одного положення в інше здійснюється автоматично з дискретністю 6 с. Напруги з вимірювачів 2 та 4 поступають в суматор 5, вихідна напруга якого, що пропорційна величині $(t_1 - t_2)/d$, поступає в блок множення 6 (конструкційна відстань d встановлюється в суматорі 5 як значення масштабного коефіцієнту). На другий вхід блоку 6 поступає вихідна напруга схеми балансування 7, що пропорційна довільному значенню величини X . Вихідна напруга блоку множення 6, пропорційна величині $(t_1 - t_2)X/d$, поступає в суматор 3, на другий вхід якого поступає напруга пропорційна значенню температури в першій точці. Таким чином, вихідна напруга суматора 3 пропорційна значенню t , відповідному довільному значенню величини X .

Вихідна напруга суматора 3 поступає в суматор 9, в який одночасно поступає напруга з вимірювача 2 температури. Вихідна напруга суматора 9, пропорційна величині $[\rho_1 - k(t - t_1)/2]$ (коефіцієнт $k/2$ встановлюється в суматорі 9 як значення масштабного коефіцієнта, а величина ρ_1 як значення вільного члена суматора), поступає в блок множення 10, на другий вхід якого поступає вихідна напруга схеми 7. Таким чином, вихід блоку 10 пропорційний величині $[\rho_1 - k(t - t_1)/2]X$, тобто розрахунковому значенню електроопору вогнетривкого матеріалу на ділянці від датчика 13 до вогневої поверхні, відповідному довільному значенню X . Виміряне значення електроопору поступає з блоку 8, а розрахункове з блоку множення 10 в суматор 11. Сигнал різниці з виходу суматора 11 поступає в схему балансування 7, яка буде змінювати своє вихідне значення, пропорційне X , до співпадіння виміряного значення електроопору з розрахунковим. При цьому вихідне значення суматора 3 буде відповідати температурі металу.

Використання запропонованого пристрою дозволяє здійснювати автоматичний контроль температури металу з більш високою точністю, в результаті чого підвищується кількість плавок, що випускається з першої повалки.

За струмом термоелектронної емісії

Для конвертерів, в яких важко встановлювати спеціальний вогнетривкий блок у футерівку запропонований пристрій, що містить два електроди, один з яких встановлюється у футерівку нижче рівня металу, а другий в ядрі факела газів, що відходять з конвертера. В основі пристрою лежить визначення струму термоелектронної емісії з поверхні розплавленого металу, величина якого залежить від температурою металу, та роботи виходу електронів. Вимірювання струмів провідності в режимі насичення між електродом та металом при рівних позитивній та від'ємній напрузі на електроді дозволяє визначити струм термоемісії з поверхні металу, а вимірювання

контактної різниці потенціалів між електродом и металом дозволяє визначити роботу виходу електронів з поверхні металу під час продувки.

Електричний струм у факелі кисневого конвертера обумовлений наявністю в ньому іонів та електронів. Зважаючи на більш низьку рухливість іонів в порівнянні з електронами, струм провідності в режимі насичення обмежується іонною складовою струму з плазми.

При від'ємній відносно ванни напрузі на електроді струм насичення дорівнює

$$I_1 = 2S_e j_i, \quad (5)$$

де I_1 – струм насичення при від'ємній напрузі на електроді, А;

S_e – площа імітуючої поверхні електрода, що визначається його геометрією, м²;

j_i – густина іонного струму, А/м².

При позитивній напрузі на електроді виникає збільшення іонного струму термоемісії з поверхні металу

$$I_2 = 2[(S_M - S_x)j_i + S_M j_e], \quad (6)$$

де I_2 – струм насичення при позитивній напрузі на електроді, А;

S_M – площа імітуючої поверхні металу (визначається геометрією конвертера), м²;

S_x – площа холодної (неімітуючої) поверхні, електрично контактуючої з імітуючою поверхнею металу (визначається конструкцією конвертера та місцем розміщення електроду), м²;

j_e – густина термоемісійного струму, А/м².

Густина термоемісійного струму визначається температурою металу та роботою виходу електронів

$$j_e = \alpha_0 T^2 \cdot 10^{-(5040/T)\psi}, \quad (7)$$

де α_0 – річардсоновська термоемісійна стала, А/(м²К²);

T – температура металу, К;

ψ – робота виходу електронів з поверхні металу, В.

Так як поверхня розплаву являє собою суміш металу та шлаку, то величина ψ для такої поверхні лежить в межах 3,8 – 5,3 В, що для характерних температур дає значення термоемісійного струму $\sim 10^{-2}$ А.

Зміна ψ за рахунок коливання хімічного складу поверхні розплаву під час продувки контролюється по зміні контактної різниці потенціалів між електродом та ванною, наприклад, по методу Томсона-Зісмана

$$\Psi = U_k + \psi_e, \quad (8)$$

де U_k – контактна різниця потенціалів, В;

ψ_e – робота виходу електронів з поверхні електроду, В.

З врахуванням співвідношень (5)...(8) знаходять температуру металу з наступного виразу:

$$\alpha_0 T^2 10^{-5040(U_k + \psi_e)/T} = \alpha_1 I_2 - \alpha_2 I_1, \quad (9)$$

де $\alpha_1 = 1/2S_M$, м⁻²; $\alpha_2 = (1/2S_M - S_x/2S_M S_e)$ м⁻².

З виразу (9) слідує, що

$$T = \frac{2 \lg(\alpha_0^{0.5} T) - 5040(U_k + \psi_e)}{\lg(\alpha_1 I_2 + \alpha_2 I_1)}. \quad (10)$$

Розроблений нами пристрій реалізації методу (рис.3) працює наступним чином.

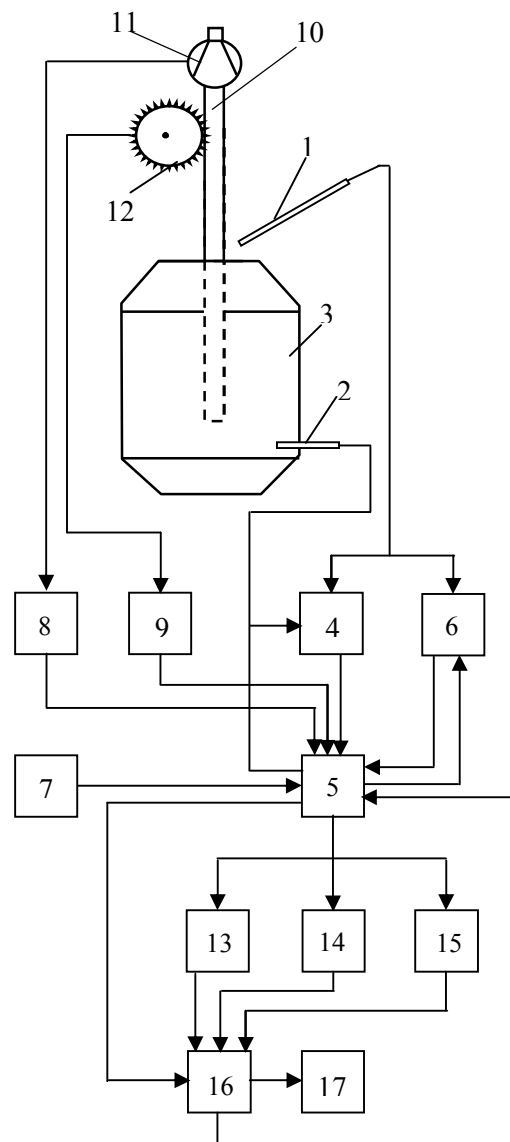


Рис. 3 Блок-схема пристрою контролю температури металу по величині струму термоелектронної емісії: 1, 2 – електроди; 3 – конвертер; 4 – вимірювач контактної різниці потенціалів; 5 – блок керування; 6 – вимірювач струму; 7 – блок живлення; 8 – вимірювач витрат кисню; 9 – вимірювач відстані сопла фурми до рівня спокійного металу; 10 – фурма; 11 – датчик витрати кисню; 12 – датчик відстані сопла фурми до рівня спокійного металу; 13, 14, 15 – блоки пам'яті; 16 – обчислювальний блок; 17 – вказівник температури металу.

При опусканні фурми 10 в конвертер 3 та подачі кисню напруга від датчиків 11 витрат кисню і 12 відстані фурми до рівня спокійного металу передаються у відповідні вимірювачі 8 та 9. При досягненні цими параметрами значення, що дорівнює 75 % номінального, спрацьовують позиційні контакти у вимірювачах 8 та 9, що включають блок 5 керування. Блок 5 керування підключає вихід вимірювача 4 контактної різниці потенціалів до блоку 13 пам'яті. Вимірювач 4 вимірює контактну різницю потенціалів між електродом 1 та поверхнею розплаву, обумовлену різницею робіт виходу електронів. Таким чином, покази блоку 13 пам'яті будуть пропорційні величині U_k . Далі блок 5 керування вимикає вимірювач 4 від блоку 13 пам'яті та підключає блок 7 живлення в мережу: електрод 2 – факел – електрод 1 – вимірювач 6 струму. Блок 7 живлення виробляє пілкоподібний імпульс напруги.

При підході рівня напруги до максимального значення блок 5 керування підключає вихід вимірювача 6 струму до блоку 14 пам'яті. При цьому покази блоку 14 пропорційні величині I_1 .

Далі блок 5 вимикає блок 14 від вимірювача 6, виконує перемикання полярності мережі та при підході рівня напруги до максимального блок 5 керування вмикає вихід вимірювача 6 струму до блоку 15 пам'яті. Показання блоку 15 пам'яті пропорційні величині I_2 . Блок 5 керування подає команду в обчислювальний блок 16 на проведення обчислення значень температури по співвідношенню (10).

Обчислене значення передається на показчик 17 температури металу, виконаний у вигляді суматора, що перетворює значення температури з абсолютної в градуси Цельсія. Одночасно з обчислювального блоку 16 в блок 5 керування потрапляє сигнал про закінчення вимірювань. По цьому сигналу блок 5 приводить пристрій в початкове положення та цикл вимірювань повторюється. При закінченні продувки позиційні контакти у вимірювачах 8 и 9 розмикаються та блок 5 керування вимикається.

Промислові випробування пристрою на Єнакіївському металургійному заводі показали можливість контролювати температуру ванни зі стандартним відхиленням, що не перевищує 12 °С.

Висновки та перспективи розвитку.

1. Розроблені методи контролю температури металу за її розподіленням у футерівці конвертера забезпечують контроль практично протягом кампанії конвертера. Термопарний блок повинен установлюватися під поверхнею металу в місці мінімального зношення футерівки.

2. Теоретично обґрунтований і перевірений в промислових умовах метод контролю температури ванни за струмом термоелектронної емісії.

3. Підвищення точності контролю температури запропонованими методами можна забезпечити введенням зворотного зв'язку за результатами періодичного прямого вимірювання температури занурювальним зондом [6].

1. Измерение температуры металла по ходу плавки в конвертере с верхней подачей кислорода / В.С.Кочо, В.И.Лапицкий, Л.Д.Пайзанский и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1964. – № 2. – С. 28 – 31.
2. Автоматизированный контроль температуры стали в кислородном конвертере / Н.А.Сорокин, И.Г.Хавруняк, Е.И.Беляев, Н.А.Цыбенко // *Комплексная автоматизация сталеплавильного производства*. – К.: Техніка, 1970. – С. 23 – 28.
3. Сергеева К.О. Вимірювання температури сталі у конвертері / К.О. Сергеева // *Металознавство та обробка металів*. – 2010. – № 1. – С. 36-39.
4. Богушевский, В. С. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В. С. Богушевский, Л. Ф. Литвинов, Н. А. Рюмшин, В. В. Сорокин. – К.: НПК “Киевский институт автоматики”, 1998. – 304 с.
5. Богушевський В. С. Контроль температурного режиму конвертерної плавки / В. С. Богушевський, К.О. Сергеева // *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. – 2009. – № 6. – С. 75-80.
6. Богушевский В.С. Управление доводкой конвертерной плавки /В.С. Богушевский, В.Ю. Сухенко, Е.А.Сергеева // *Металл и литье Украины*. – 2010. –№ 3. С. 14 – 18.