

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С. Богусевський, С.В. Жук

Національний технічний університет України "КПІ"

## ТЕПЛОВІ ВТРАТИ КОНВЕРТЕРА ЯК СКЛАДОВІ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ КОНВЕРТЕРНОЇ ВАННИ

*У статті з метою уточнення проведені дослідження моделі контролю температурного режиму ванни конвертера на основі теоретичного обґрунтування теплових втрат конвертера під час його простою.*

В останній час при керуванні конвертерною плавкою внаслідок використання технології з окисненням вуглецю до малих часток (0,04 – 0,05 %) з наступним науглецюванням металу в ковші, основна увага приділяється отриманню заданої температури металу. Це особливо стосується цехів, що не оснащені агрегатами доводки, або оснащені агрегатами, в яких відсутня можливість нагрівання металу.

Відомі динамічні моделі контролю температурного режиму [1 – 3] враховують теплові втрати конвертера за емпіричними рівняннями, в моделі [4] добре визначена складова температурних втрат, що зв'язана з акумуляцією тепла футерівкою. Але теплові втрати, під час простою конвертера, зокрема через стінку й горловину розглянуті недостатньо. Умовно під простоем конвертера розуміють період плавки між зливом металу попередньої плавки й початком продувки поточної. При ритмічній роботі конвертера цей час не перевищує 0,5 год., коливання його від плавки до плавки є невеликими й суттєво не впливають на зміну теплового режиму плавки. При зверхнормативному простоеї більше 1 год. теплові втрати суттєво впливають на динаміку процесу й їх бажано враховувати. В практиці роботи конвертерних цехів теплові втрати, що викликані зверхнормативним простоем, враховують при простоях вище 4 год., шляхом зменшення кількості металобрухту в шихті. Як правило, після таких простоїв плавка не попадає по закінченні продувки в задані достатньо вузькі межі по температурі й потребує коректувальних операцій, що знижує продуктивність конвертера й якість металу.

Наведені в статті дослідження проводились в Національному технічному університеті України "КПІ" по темі "Математичні моделі й алгоритми системи управління кисневим конвертером" державний реєстраційний номер 0110U002880.

**Результати досліджень.** В основу теоретичного дослідження тепловтрат покладені такі міркування по вибору умов однозначності теплової роботи футерівки конвертера. Гранична умова на нерухомій поверхні стінки конвертера, що взаємодіє з зовнішнім середовищем, задається по закону конвекції. При цьому необхідно відмітити, що з розширенням діапазону температури, що враховується, на границі стінки (вся кампанія футерівки) умови зовнішнього теплообміну будуть непостійними, що приводить до задачі з нелінійними граничними умовами третього роду.

Коефіцієнт тепловіддачі від плоскої стінки до зовнішнього середовища визначається по формулі Нусельта [5]:

$$\alpha = 9,78 + 0,07(t_2 - t_c), \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з врахуванням випромінювання, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $t_2, t_c$  – температура відповідно зовнішньої поверхні обшивки конвертера по ходу кампанії його футерівки (для  $N$ -ї плавки в момент начала простою агрегату) і зовнішнього середовища, °С.

Закон зміни вогневої границі футерівки отримано із умов її рівномірного по масі зносу за плавку, що експериментально підтверджено при вивченні характеру розподілення температури в стінці. Зміна температури зовнішньої поверхні різних частин конвертера за результатами спостережень у ході кампанії футерівки показана на рис. 1. Із графіка видно, що найбільша температура спостерігається у верхній конусній частині, найменша – на нижній. Таке розподілення температури знаходиться у відповідності з товщиною і ступенем зносу вогнетривкої цегли й її теплоізоляційними властивостями. Круте піднімання температури обшивки на всіх ділянках на початку кампанії конвертера по футерівці зв'язане з її розігрівом.

Для приведення вихідних даних по температурі поверхні, що віддає тепло, до умов "середньої" задачі, експериментальні дані оброблені по формулі розрахунку середньозваженого значення  $\bar{t}_s$ , °C:

$$\bar{t}_s = \frac{\sum_{i=1}^n t_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2)$$

де  $t_i$  – температура  $i$  – ї ділянки зовнішньої поверхні агрегату з розмірною в даний момент часу температурою, °C;  $n$  – число ділянок;  $F_i$  – площа зовнішньої поверхні  $i$  – ї ділянки агрегату з розмірною в даний момент часу температурою, м<sup>2</sup>.

Отримане поле розрахункових крапок нескладно апроксимувати експоненціальною залежністю:

$$\bar{t}_s = \theta \{1 - \exp[-\vartheta_1 (N + \eta_1) / N_*]\} \quad (3)$$

де  $\theta, \vartheta_1, \eta_1$  – емпіричні коефіцієнти, що для 160 – тонного конвертера відповідно дорівнюють 385°C; 2,8 і 11;  $N, N_*$  – поточний номер плавки по ходу кампанії футерівки та її стійкість.

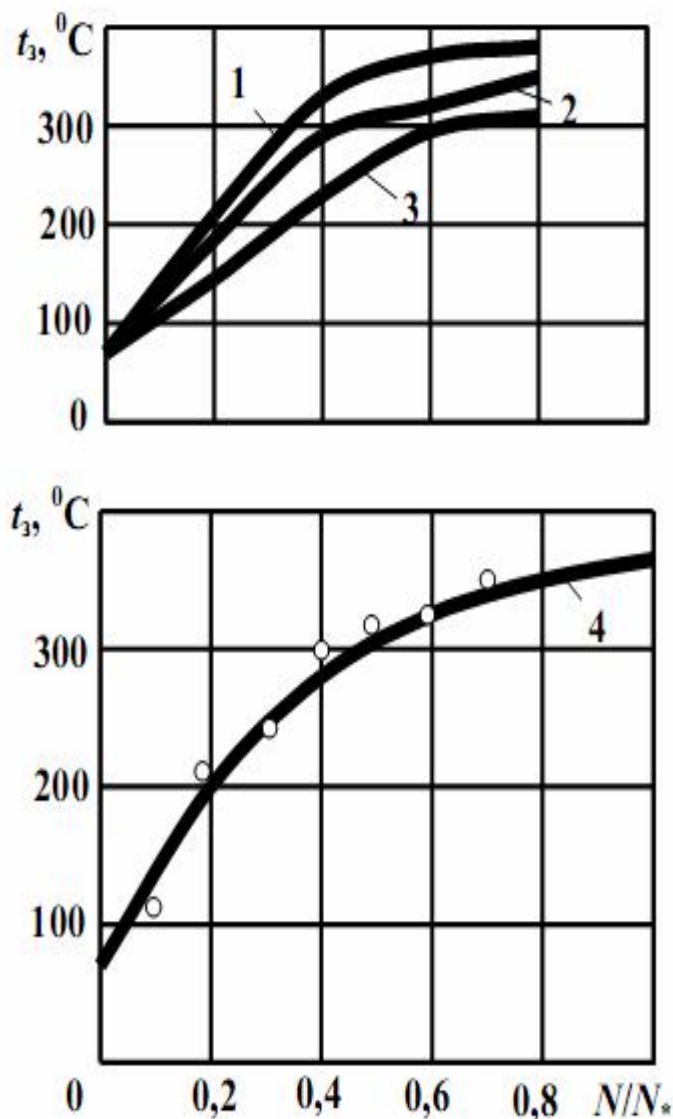


Рис. 1. Зміна температури зовнішньої поверхні обшивки 160-тонного конвертера по ходу кампанії футерівки: 1...3 – експериментальні криві за показаннями поверхневих термопар, відповідно для верхньої конусної, циліндричної і нижньої конусної частин; – значення середньо зваженої температури; 4 – апроксимуюча крива, по формулі (3)

Як показали експериментальні дослідження, в діапазоні простою агрегату до 0,5 год. температура зовнішньої поверхні внаслідок дуже великої теплової акумуляції футерівки змінюється на величину, значенням якої без значної похибки можна знехтувати (рис. 2). Тут – експериментальні крапки по показанням поверхневих термопар; лінія апроксимації по формулі (4):

$$t_3(\tau_n) = t_c + (t_3 - t_c) \exp(-\beta \tau_n), \quad (4)$$

де  $t_3(\tau_n)$  – зміна температури обшивки в залежності від тривалості простою конвертера, °С;  $\tau_n$  – тривалість простою, год.;  $\beta$  – емпіричний коефіцієнт, що характеризує темп охолодження і дорівнює 0,306, год.<sup>-1</sup>.

Питоме значення поверхневої щільності теплового потоку в зовнішнє середовище  $q(\tau_n)$ , Вт/(м<sup>2</sup>×100 кг чавуна), визначаємо по формулі:

$$q(\tau_n) = \alpha [\bar{t}_3(\tau_n) - t_c] / 10 \bar{m}_ч, \quad (5)$$

де  $\bar{m}_ч$  – середня за кампанію маса чавуна на плавку, т;  $\bar{t}_3(\tau_n)$  – середньозважена температура зовнішньої поверхні обшивки конвертера в залежності від тривалості простою конвертера, що визначається по формулі (4) підстановкою замість  $t_3(\tau_n)$  і  $t_3$  відповідно середньозважених значень  $\bar{t}_3(\tau_n)$  та  $\bar{t}_3$ , °С.

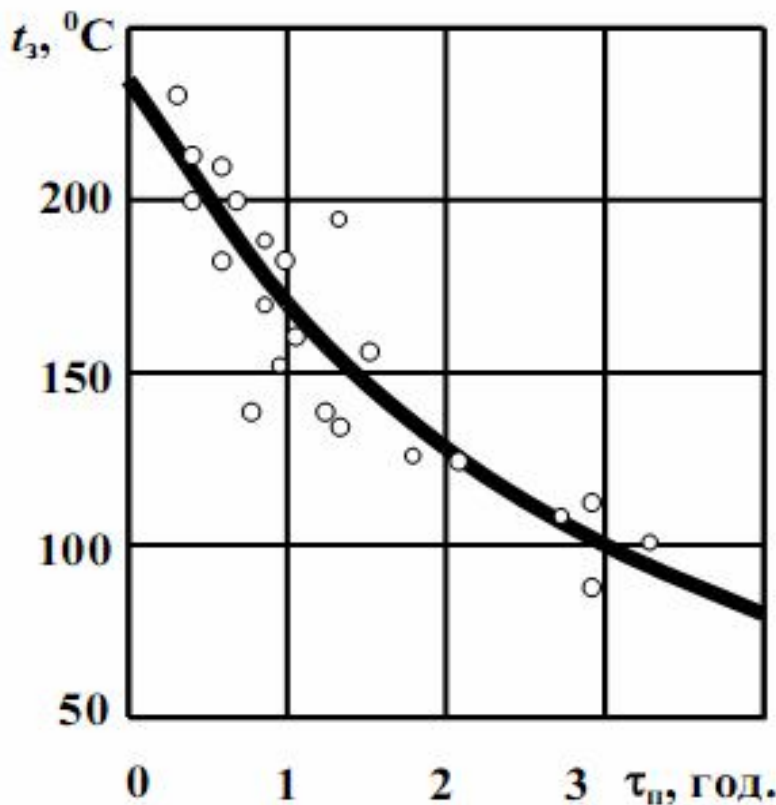


Рис. 2. Залежність температури зовнішньої поверхні обшивки 160-тонних конверторів від тривалості простою

Питоме значення втрат теплоти в зовнішнє середовище через стінку конвертера при зверхнормативному простої з урахуванням (1) визначаємо як:

$$Q(\tau_n) = 3600 \sum_{i=0}^n F_i \int_0^{\tau_n} q(\tau_n) d\tau_n = 3600 \cdot 9,78 \sum_{i=0}^n F_i (\bar{t}_3 - t_c) \times [1 - \exp(-\beta \tau_n)] : 10 \bar{m}_ч \beta + 3600 \cdot 0,07 \sum_{i=0}^n F_i (\bar{t}_3 - t_c)^2 \times [1 - \exp(-2\beta \tau_n)] / 2 \cdot 10 \bar{m}_ч \beta, \quad (6)$$

де  $Q(\tau_n)$  – питоме значення втрат теплоти тепловіддачею в навколишнє середовище зовнішньою стінкою конвертера при зверхнормативному простої, Дж/100 кг чавуна.

Виражаючи  $\bar{t}$ , через  $N$  відповідно формулі (3), отримуємо розвернуту формулу тепловтрат конвертера при зверхнормативному простої:

$$Q(\tau_n) = 3600 \cdot 9,78 \sum_{i=1}^n F_i \{ \theta [1 - \exp(-\theta(N + \eta)/N_s)] - t_c \} \times [1 - \exp(-\beta\tau_n)] : 10\bar{m}_q\beta + 3600 \cdot 0,07 \sum_{i=1}^n F_i \{ \theta [1 - \exp(-\theta(N + \eta)/N_s)] - t_c \}^2 [1 - \exp(-2\beta\tau_n)] : 20\bar{m}_q\beta, \quad (7)$$

Формулу для розрахунку питомих тепловтрат конвертера випромінюванням через горловину в залежності від тривалості простою, що отримана моделюванням процесу охолодження як термічно "тонкого" тіла, представимо у вигляді:

$$Q_\tau = 3600 \cdot 10^{-8} \pi C_\varepsilon \varepsilon \gamma \psi \bar{R}_r^2 (T_{\text{ж}} - 1/\sqrt[3]{3k\tau_n + T_{\text{ж}}^{-3}}) / 10\bar{m}_q k, \quad (8)$$

де  $Q_\tau$  – питомі інтегральні тепловтрати конвертера випромінюванням через горловину в залежності від тривалості простою, Дж/100 кг чавуна;  $C_\varepsilon$  – коефіцієнт, що визначається постійною Стефана - Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>/К<sup>4</sup>);  $\varepsilon$  – інтегральний напівсферичний ступінь чорноти випромінюванням (випромінююча здатність) матеріалу порожнини конвертера;  $\gamma, \psi$  – коефіцієнти відповідно почорніння порожнини конвертера і діафрагмування стінками горловини;  $\bar{R}_r^2$  – середній за кампанію радіус горловини конвертера, м;  $k$  – коефіцієнт, що характеризує темп охолодження порожнини і дорівнює для 160-тонного конвертера  $19,2 \times 10^{-11}$  год.<sup>-1</sup>К<sup>-3</sup>;  $T_{\text{ж}}$  – абсолютна температура готового металу попередньої плавки, що дорівнює температурі внутрішньої поверхні конвертера на початку простою, К.

Втрати теплоти розраховуються як сума складових (7) і (8).

При практичній реалізації в моделі динамічного контролю температури в ванні 160-тонного конвертера ВАТ «Арселорміттал, Кривий Ріг», вплив теплових втрат від тривалості простою, що перераховані на температуру визначали по формулі [4]:

$$\Delta t = f(\tau_n). \quad (9)$$

Тут функція від тривалості простою:

$$f(\tau_n) = \begin{cases} \alpha_1 - \text{для } \tau_n < 0,2 \text{ год.;} \\ \alpha_2(\tau_n - 0,2) - \text{для } 0,2 \text{ год.} < \tau_n < 1,0 \text{ год.;} \\ \alpha_3(\tau_n - 1,0) + \alpha_4 - \text{для } 1,0 \text{ год.} < \tau_n < 2,0 \text{ год.;} \\ \alpha_5(\tau_n - 1,0) + \alpha_6 - \text{для } \tau_n > 2,0 \text{ год.} \end{cases}$$

## Висновки

Дослідження теплових втрат конвертера в процесі простою показало їх суттєвий вплив на динаміку зміни температури ванни в процесі продувки при тривалості простою, що перевищує 0,5 год.

Моделювання процесу показало добре співпадіння розрахункових і фактичних результатів плавки. Модель контролю температурного режиму конвертерної плавки з урахуванням теплових втрат конвертера під час простою передана ТОВ „ТРЕІ-Україна” для впровадження на конвертері № 3 ВАТ «Арселорміттал, Кривий Ріг».

Подальші дослідження будуть проводитись у напрямку розробки системи керування температурним режимом як складової частини АСКТП конвертерної плавки.

1. Математическая модель АСУ конвертерной плавкой / В.С.Богушевский, Ю.В.Оробцев, Н.А.Рюмшин, Н.А.Сорокин. – К.: НПК „Киевский институт автоматики”, 1996. – С. 212.
2. Богушевський В.С., Сергеева К.О. Контроль температурного режиму конвертерної плавки // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2009. – № 6. – С. 75 – 80.
3. Богушевський В.С., Сергеева Е.А., Жук С.В. Модель переноса массы и теплоты в квазигомогенном приближении // MANTRIFLY VI MIĘDZYKONFERENCJA NAUKOWO-PRAKTYCZNEJ KONFERENCJI “NAUKOWA PRZESTRZEC EUROPY-2010”, Przemysł, 7-12, 2010, Vol. 19, С. 27 – 32.
4. Богушевський В.С., Жук С.В. Динамічна модель контролю температурного режиму конвертерної ванни // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2011. – № 1. – С. 90 – 96.
5. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники. – Л.: ГХИ, 1961. – С. 820.