

## Машинобудування і зварювальне виробництво

состава. Это открывает новые возможности повышения эффективности модернизации существующих наплавочных установок.

**Ключевые слова.** Электродуговая наплавка, наплавочная установка, конфигурация наплавленного слоя, переменный химический состав, система управления, шаговый двигатель, широтно-импульсная модуляция, экспериментальная установка, программное управление, интегрированная среда разработки, контроллер, персональный компьютер.

Shcherbakov S. V., Cherevko O. O.

### DEVELOPMENT OF SOFTWARE AND HARDWARE TO CONTROL THE PROCESS OF AN AUTOMATED WELDING (SURFACING)

*The authors proposed a system for controlling the process of electric arc surfacing through two identical channels, including a regulator and a stepper motor control unit. It is shown that in the control system it is advisable to use stepper motors with the function of tracking the position of the shaft to implement feedback. Information about its position for each of the channels is fed to the input of the regulating controller for the formation of control signals proportional to the magnitude of the inconsistency. Specialized software has been developed for controlling the speed of rotation of engines using specified algorithms for moving the alloying electrode. For the purpose of software testing and practical implementation of the stepper motor control model, a software and hardware complex has been created. The complex includes experimental stand, personal computer, programmable microcontroller, control system. Based on a programmable microcontroller, an alternative control circuit for bipolar DC stepper motors of the NEMA 17 (23) type using bridge power drivers has been developed. Programming of the microcontroller is carried out using a personal computer. The formation of control signals for the drives for supplying electrodes with different content of alloying elements is implemented using a program in accordance with a given law (functional dependence). It has been established that the coordinated control of all drives of the installation makes it possible to control the process of formation of a layer of complex configuration and variable chemical composition. This opens up new opportunities for improving the efficiency of the modernization of existing surfacing installations.*

**Keywords.** Electric arc surfacing, surfacing installation, layer configuration, variable chemical composition, control system, stepper motor, pulse-width modulation, experimental stand, software control, integrated development environment, controller, personal computer.

Стаття надійшла 20.04.2022 р.

УДК 669.162.22

[doi.org/10.31498/2522-9990252023286611](https://doi.org/10.31498/2522-9990252023286611)

Черевко О.О., Щербаків С.В.

### РОЗРОБКА МЕТОДУ ОПЕРАТИВНОГО КОРИГУВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ ЗРОШЕННЯ У СЕКЦІЯХ ЗОНИ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ МБЛЗ

*Вирішення проблем із якістю слябів, виготовлених в умовах МБЛЗ, пов'язане з налагодженням і оптимізацією роботи системи автоматичного охолодження в секціях ЗВО та коригуванням роботи технологічного обладнання. В даний час розрахунок оптимальних витрат води на секції зон вторинного охолодження є важким завданням, що вирішується впровадженням комплексних підходів – від експериментальних досліджень та*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

математичного моделювання до застосування сучасних методів управління з використанням мікропроцесорних засобів.

Для підвищення якості функціонування динамічної системи вторинного охолодження (ДСВО) пропонується включити до її складу засоби контролю температури поверхні зливка в ЗВО. Безпосередній контроль температури поверхні зливка дозволить підвищити точність моделі кристалізації та покращити роботу ДСВО та системи м'якого обтиснення, які відповідають за якість продукції.

Внесені пропозиції щодо доповнення ДСВО підсистемою коригування щільності зрошення в секціях ЗВО та підсистемою налаштування моделей кристалізації та вторинного охолодження зливка.

Для дослідження роботи вдосконаленої системи управління створені моделі кристалізації та охолодження зливка у ЗВО, в основі яких лежить чисельне рішення задачі нестационарної теплопровідності. Дослідження показали, що запропоновані нововведення дозволяють максимально наблизити дійсну температуру поверхні зливка до еталонного профілю, що підвищує якість одержуваної продукції.

**Ключові слова.** МБЛЗ, зливки, вторинне охолодження, щільність зрошення, система автоматизованого управління, експеримент, комп'ютерне моделювання.

**Постановка проблеми.** Якість суцільнолитих злиwkів великою мірою залежить від організації режимів вторинного охолодження. На сучасних МБЛЗ використовуються динамічні системи вторинного охолодження, які дозволяють оперативно коригувати параметри вторинного охолодження на основі інформації про поточний тепловий стан зливка, яку ДСВО отримує в режимі реального часу. Необхідність отримання достовірної інформації про поточний стан зливка є головною складністю при побудові ДСВО. На даний час не існує методу, який би дозволяв безперервно контролювати температуру внутрішніх точок зливка, і розробка такого методу найближчим часом не є можливою. Застосування математичних моделей вимагає завдання граничних умов на поверхні зливка. Для точного завдання граничних умов необхідний безперервний контроль температури поверхні зливка в ЗВО та усунення розбіжностей між дійсним та еталонним профілями температури поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У літературних джерелах [1, 2] наводяться рекомендації щодо раціональної організації режиму вторинного охолодження зливка. Всі вимоги зводяться до підтримки еталонного профілю температури поверхні зливка протягом технологічної лінії МБЛЗ, що є метою функціонування багатьох САУ вторинним охолодженням.

У всіх системах управління вторинним охолодженням керуючим впливом є витрати охолоджуючого середовища, що подається на поверхню зливка. В якості охолоджуючого середовища в сучасних МБЛЗ використовується водоповітряна суміш, яка має низку переваг перед іншими охолоджувачами [2].

У джерелах [2, 3] наводиться опис системи управління вторинним охолодженням, в якій витрати охолоджуючої води змінюються в залежності від швидкості витягування зливка. Задане значення витрат води надходить на локальні регулятори кожної з секцій ЗВО. Крім того, в даній системі контролюється температура поверхні зливка на виході кожної секції ЗВО. Регулятори температури коригують задані витрати води для кожної секції таким чином, щоб звести різницю між поточною і заданою температурою поверхні зливка до нуля. Для контролю температури використовуються стаціонарні пірометри спектрального відношення. Однак, на сучасних МБЛЗ практично відсутні відкриті (незрошувані) ділянки зливка, і візування пірометрів доводиться здійснювати в зазори між роликками через щільний шар пароводяної суспензії, що неможливо без застосування спеціальних пристроїв.

Найпрогресивніші з розроблених останнім часом систем управління вторинним

## Машинобудування і зварювальне виробництво

охолодженням засновані на динамічному моделюванні температурного поля безперервнолітої заготовки [4]. Модель кристалізації включає завдання граничних умов на поверхні зливка. Для точного завдання граничних умов потрібний безпосередній контроль температури поверхні зливка.

У роботі [5] запропоновано метод безпосереднього контролю температури поверхні зливка на МБЛЗ за допомогою пірметрів. Під час роботи автоматизованої системи контролю температури виникають розбіжності між дійсним та еталонним профілями температури поверхні. Ці розбіжності можуть бути усунені шляхом коригування щільності зрошення в секціях зони вторинного охолодження для різних швидкостей розливання.

**Мета досліджень.** Вдосконалення системи керування вторинним охолодженням злиwkів за рахунок коригування щільності зрошення в секціях ЗВО.

**Основний матеріал досліджень.** Для завдання еталонного профілю температури середини широкої грані зливка в ЗВО була використана функція (1), взята з джерела [4].

$$\begin{cases} T_n^{эм}(z) = \frac{T_k}{(z - L_{кр}^a + 1)^n} \\ n = \frac{\ln(T_k / T_{ЗВО})}{\ln(L_{ЗВО} + 1)} \end{cases}, \quad (1)$$

де  $T_n^{эм}$  – еталонна температура поверхні зливка в ЗВО,  $^{\circ}C$ ;  $z$  – координата, що збігається з напрямком витягування зливка,  $m$ ;  $T_k$  – температура поверхні зливка на виході з кристалізатора,  $^{\circ}C$ ;  $L_{кр}^a$  – активна довжина кристалізатора,  $m$ ;  $n$  – допоміжна змінна;  $T_{ЗВО}$  – бажана температура поверхні зливка на виході із ЗВО,  $^{\circ}C$ ;  $L_{ЗВО}$  – довжина ЗВО,  $m$ .

На рисунку 1 наведено приклад еталонного профілю температури поверхні зливка, розрахованого з використанням функції (1). Він задовольняє вимогам, що пред'являються до раціонального режиму охолодження поверхні зливка [2].

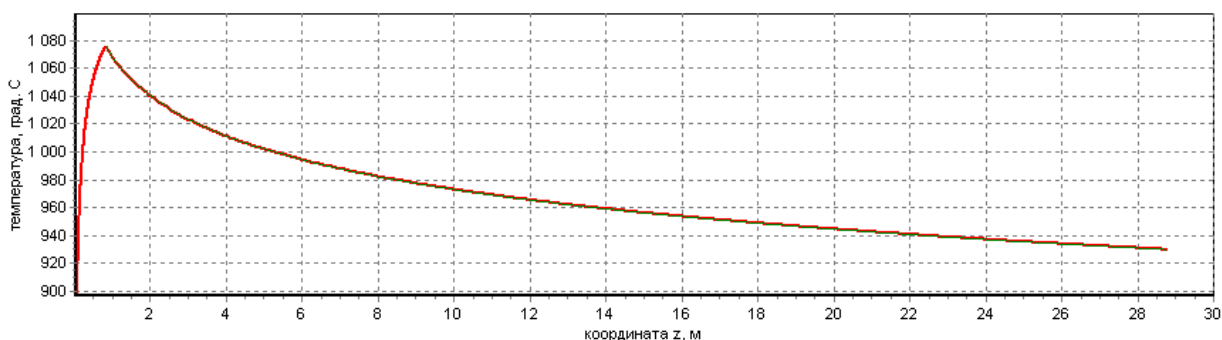


Рисунок 1 – Еталонний профіль температури поверхні зливка

Якщо відомий еталонний профіль температури поверхні зливка, то можна задати в моделі кристалізації граничні умови першого роду і зробити розрахунок температурного поля. На підставі температурного поля зливка розраховуються значення теплових потоків на його поверхні:

## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\begin{cases} q_R(z) = -\lambda_{\text{э}}(T) \frac{\partial T(0, z)}{\partial x}; \\ q_r(z) = -\lambda_{\text{э}}(T) \frac{\partial T(Lx, z)}{\partial x}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $q_R, q_r$  – густини теплових потоків на поверхнях великого ( $R$ ) і малого ( $r$ ) радіусів зливка відповідно,  $\frac{Bm}{M^2}$ ;  $\lambda_{\text{э}}(T)$  – ефективна теплопровідність металу,  $\frac{Bm}{M \cdot ^\circ C}$ ;  $T(0, z), T(Lx, z)$  – температура поверхні великого ( $R$ ) та малого ( $r$ ) радіусів зливка відповідно.

Для кожної із секцій ЗВО обчислюється середнє значення теплового потоку:

$$\bar{q}_i = \frac{1}{z_i^k - z_i^h} \int_{z_i^h}^{z_i^k} q(z) \cdot dz, \quad (3)$$

де  $\bar{q}_i$  – середнє значення щільності теплового потоку на поверхні зливка для  $i$ -ї секції ЗВО,  $\frac{Bm}{M^2}$ ;  $z_i^h, z_i^k$  – координати початку та кінця  $i$ -ї секції ЗВО,  $m$ ;  $q(z)$  – значення щільності теплового потоку на поверхні зливка в залежності від координати,  $\frac{Bm}{M^2}$ .

Таким чином, задавши в моделі еталонний профіль температури поверхні зливка (граничні умови першого роду), отримуються середні значення щільності теплових потоків для секцій ЗВО, при яких забезпечується задана температура поверхні зливка.

Щільність зрошення в секціях ЗВО, при яких забезпечуються задані значення теплових потоків і задана температура поверхні зливка дорівнює:

$$q(z) = \alpha(z)(T_{\text{п}}(z) - T_{\text{в}}), \quad (4)$$

де  $q(z)$  – значення щільності теплового потоку на поверхні зливка в залежності від координати,  $\frac{Bm}{M^2}$ ;  $\alpha(z)$  – значення коефіцієнта тепловіддачі в залежності від координати,  $\frac{Bm}{M^2 \cdot ^\circ C}$ ;  $T_{\text{п}}(z)$  – температура поверхні зливка,  $^\circ C$ ;  $T_{\text{в}}$  – температура охолоджуючої води,  $^\circ C$ .

Щільність зрошення є сталою величиною в межах однієї секції ЗВО і змінюється при переході з однієї секції в іншу. Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі для  $i$ -ї секції ЗВО обчислюється за формулою:

$$\bar{\alpha}_i = B_i g_i + \alpha_{0,i}, \quad (5)$$

де  $\bar{\alpha}_i$  – середнє значення коефіцієнта тепловіддачі для  $i$ -ї секції ЗВО,  $\frac{Bm}{M^2 \cdot ^\circ C}$ ;  $g_i$  – щільність зрошення для  $i$ -ї секції ЗВО,  $\frac{M^3}{\text{год} \cdot M^2}$ ;  $B_i, \alpha_{0,i}$  – константи.

З урахуванням (5) щільність теплового потоку в  $i$ -й секції ЗВО набуває вигляду:

$$q_i(z) = \bar{\alpha}_i (T_{\text{п}}(z) - T_{\text{в}}). \quad (6)$$

Середнє значення густини теплового потоку в  $i$ -й секції ЗВО може бути знайдено шляхом інтегрування функції (6) за координатою  $z$ .

$$\bar{q}_i = \frac{1}{z_i^k - z_i^h} \int_{z_i^h}^{z_i^k} \bar{\alpha}_i (T_{\text{п}}(z) - T_{\text{в}}) \cdot dz. \quad (7)$$

Після обчислення інтеграла у виразі (7) та додаткових перетворень:

## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\bar{q}_i = \bar{\alpha}_i (\bar{T}_{n,i} - T_B), \quad (8)$$

де  $\bar{T}_{n,i}$  – середня температура поверхні зливка для  $i$ -ї секції ЗВО.

Середня температура поверхні зливка для  $i$ -ї секції ЗВО може бути знайдена за формулою:

$$\bar{T}_{n,i} = \frac{1}{z_i^k - z_i^h} \int_{z_i^h}^{z_i^k} T_n(z) \cdot dz. \quad (9)$$

За допомогою моделі кристалізації зливка обчислюється значення середньої щільності теплових потоків у секціях ЗВО  $\bar{q}_i$ , при яких забезпечується задана температура поверхні. Підставивши (5) у (8) отримаємо:

$$\bar{q}_i = (B_i g_i + \alpha_{0,i}) \cdot (\bar{T}_{n,i} - T_B). \quad (10)$$

З виразу (10) можна знайти значення щільності зрошення для  $i$ -ї секції ЗВО:

$$g_i = \frac{1}{B_i} \left( \frac{\bar{q}_i}{\bar{T}_{n,i} - T_B} - \alpha_{0,i} \right). \quad (11)$$

Знаючи щільність зрошення, можна знайти витрати води для  $i$ -ї секції ЗВО:

$$F_i = g_i \cdot S_i, \quad (12)$$

де  $F_i$  – витрати води на  $i$ -у секцію ЗВО,  $\frac{m^3}{200d}$ ;  $g_i$  – щільність зрошення для  $i$ -ї секції ЗВО,  $\frac{m^3}{200d \cdot m^2}$ ;  $S_i$  – площа поверхні  $i$ -ї секції ЗВО,  $m^2$ .

Алгоритм методу оперативного коригування щільності зрошення у секціях ЗВО для певної швидкості витягування зливка складається з наступних етапів:

1. Завдання значення швидкості витягування, на яку потрібно зробити коригування режиму вторинного охолодження зливка.
2. Завдання в моделі кристалізації зливка граничних умов першого роду у вигляді еталонного профілю температури поверхні.
3. Здійснення розрахунку температурного поля зливка. За формулою (3) визначаються середні значення щільності теплових потоків  $\bar{q}_i$  для всіх секцій ЗВО. За формулою (9) визначаються середні температури поверхні зливка  $\bar{T}_{n,i}$  для всіх секцій ЗВО.
4. Для кожної із секцій ЗВО встановлюються значення параметрів  $B_i$  і  $\alpha_{0,i}$ , а також задаються значення температури охолоджуючої води  $T_B$ .
5. За формулою (11) розраховується щільність зрошення  $g_i$  для кожної із секцій ЗВО.
6. За формулою (12) здійснюється розрахунок витрат води  $F_i$  для кожної із секцій ЗВО.

Для реалізації розробленого методу необхідно мати значення коефіцієнтів тепловіддачі для секцій ЗВО. Значення коефіцієнта тепловіддачі визначається за формулою (13), якщо відомі значення параметрів  $B$  і  $\alpha_0$ .

$$\alpha = B \cdot g_F + \alpha_0. \quad (13)$$

Запропоновано методику для експериментального визначення значень констант  $B$  і  $\alpha_0$ .

У першому експерименті необхідно визначити значення параметрів  $B_i$  і  $\alpha_{0,i}$  для  $i$ -ї секції ЗВО. Розлив проводиться з деякою постійною швидкістю  $v$ , і щільність зрошення в  $i$ -й секції ЗВО дорівнює  $g_{1,i}$ . Температура поверхні зливка в  $i$ -й секції ЗВО  $T_{n,i}$  контролюється за

Машинобудування і зварювальне виробництво

допомогою пірометра і є незмінною в часі. Також контролюється температура охолоджуючої води  $T_b$ . Тоді, використовуючи вираз (10), можна визначити середню щільність теплового потоку в  $i$ -й секції ЗВО:

$$\bar{q}_i = (B_i g_{1,i} + \alpha_{0,i}) \cdot (T_{n,i} - T_b). \quad (14)$$

Також середню щільність теплового потоку в  $i$ -й секції ЗВО можна визначити за допомогою моделі кристалізації зливка [6], задавши для цієї секції граничні умови першого роду. Для задання граничних умов першого роду використовується значення температури поверхні зливка, одержане за допомогою пірометра. Метод визначення середньої густини теплового потоку для будь-якої секції ЗВО за допомогою моделі кристалізації зливка був описаний вище.

Для зручності подальшого викладу індекси секції ( $i$ ) у формулах опускаються. Середня щільність теплового потоку, відповідна щільності зрошення  $g_1$ , позначається  $q_1$ .

У другому експерименті щільність зрошення в  $i$ -й секції ЗВО змінюється до значення  $g_2$ . Середня щільність теплового потоку  $q_2$ , відповідна щільності зрошення  $g_2$ , може бути знайдена аналогічно тому, як знаходилося значення  $q_1$  для щільності зрошення  $g_1$ .

Температура поверхні зливка, отримана при першому експерименті, позначається через  $T_{n1}$ , при другому через  $T_{n2}$ .

В результаті двох описаних вище експериментів отримано систему рівнянь:

$$\begin{cases} q_1 = (B g_1 + \alpha_0) \cdot (T_{n1} - T_b) \\ q_2 = (B g_2 + \alpha_0) \cdot (T_{n2} - T_b), \end{cases} \quad (15)$$

В результаті рішення системи рівнянь (15) розраховуються значення параметрів  $B$  і  $\alpha_0$

:

$$\begin{cases} B = \frac{q_2 \cdot (T_{n1} - T_b) - q_1 \cdot (T_{n2} - T_b)}{(T_{n1} - T_b) \cdot (T_{n2} - T_b) \cdot (g_2 - g_1)}; \\ \alpha_0 = \frac{q_2}{(T_{n2} - T_b)} - B \cdot g_2. \end{cases} \quad (16)$$

Знаючи параметри  $B$  і  $\alpha_0$ , за формулою (13) визначаються значення коефіцієнта тепловіддачі.

Для підвищення точності визначення параметрів  $B$  і  $\alpha_0$  температуру поверхні зливка в секції ЗВО слід визначати як середнє значення за деякий проміжок часу. Наприклад, замір температури поверхні зливка проводився протягом проміжку часу  $\Delta t$ . Якщо період опитування датчика температури (пірометра) становить  $t_{оп}$ , тоді за час  $\Delta t$  було зроблено

$N_{вим} = \frac{\Delta t}{t_{оп}}$  вимірів. На підставі окремих вимірів температури поверхні  $T_n^j$  середнє значення

температури поверхні зливка за інтервал часу  $\Delta t$  визначається за формулою:

$$\bar{T}_n = \frac{1}{N_{вим}} \sum_{j=1}^{N_{вим}} T_n^j. \quad (17)$$

Запропоновані методи визначення коефіцієнтів тепловіддачі та оперативного коригування щільності зрошення в секціях ЗВО реалізовані програмно. Створена модель процесу охолодження зливка у ЗВО. Результати дослідження роботи вдосконаленої системи керування вторинним охолодженням на моделі наводяться нижче.

Графік дійсної температури поверхні зливка (малий радіус,  $r$ ), отриманий у ході

## Машинобудування і зварювальне виробництво

дослідження, представлений на рисунку 2.

Порівняння дійсної температури поверхні зливка для швидкості витягування 1,1 м/хв з еталонним профілем показує, що у верхніх секціях ЗВО інтенсивність вторинного охолодження недостатня, у зв'язку з чим спостерігається підвищене значення температури поверхні зливка. У нижніх секціях ЗВО інтенсивність вторинного охолодження, навпаки, надмірна, що призводить до переохолодження поверхні зливка. Аналогічна ситуація спостерігається для інших швидкостей витягування з робочого діапазону. Таким чином, можна зробити висновок, що існуючий режим вторинного охолодження потребує коригування.

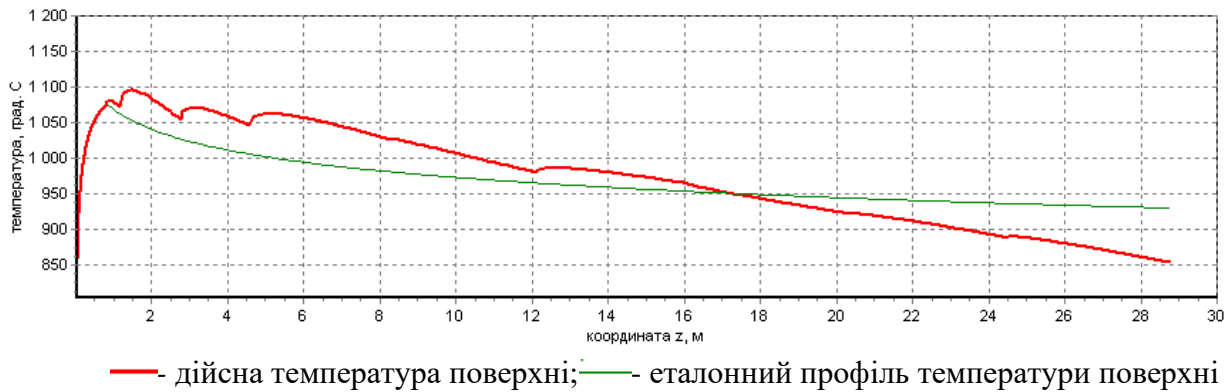


Рисунок 2 – Температура поверхні малого радіусу зливка до коригування режиму вторинного охолодження, швидкість витягування 1,1 м/хв

Для внесення змін до існуючого режиму вторинного охолодження використано метод оперативного коригування щільності зрошення в секціях ЗВО. Результат застосування цього методу продемонстрований на рис. 3.

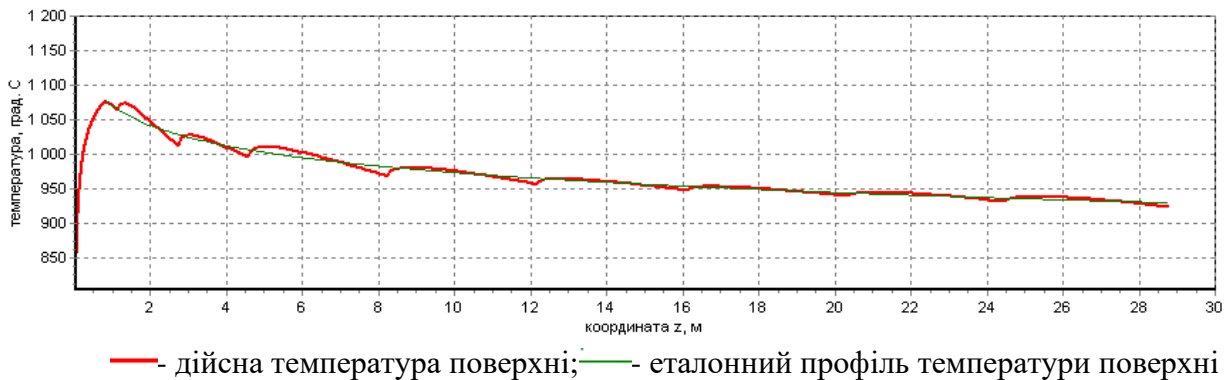


Рисунок 3 – Температура поверхні малого радіусу зливка після коригування режиму вторинного охолодження, швидкість витягування 1,1 м/хв

Зміни, внесені до режиму вторинного охолодження зливка, дозволили максимально наблизити дійсну температуру поверхні зливка до еталонного профілю. Відмінності між дійсною температурою поверхні та еталонним профілем температури, що залишилися після коригування вторинного охолодження, обумовлені конструктивними особливостями МБЛЗ. Залишкові відмінності викликані тим, що щільність зрошення стрибкоподібно змінюється під

## Машинобудування і зварювальне виробництво

час переходу з однієї секції вторинного охолодження до іншої (рис. 4).

Для подальшого підвищення якості вторинного охолодження зливка необхідне внесення змін до конструкції МБЛЗ.

Далі представлено результати роботи методу визначення значень коефіцієнтів тепловіддачі у секціях ЗВО.

Для деякої секції ЗВО дійсні значення параметрів коефіцієнта тепловіддачі становлять:

$$B = 40 \frac{Вт \cdot год}{м^3 \cdot ^\circ C}; \quad \alpha_0 = 120 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}.$$

Припускається, що режим вторинного охолодження зливка є скоригованим в ході процедури, описаної вище, і значення дійсної температури поверхні зливка відповідає еталонному профілю з високою точністю.

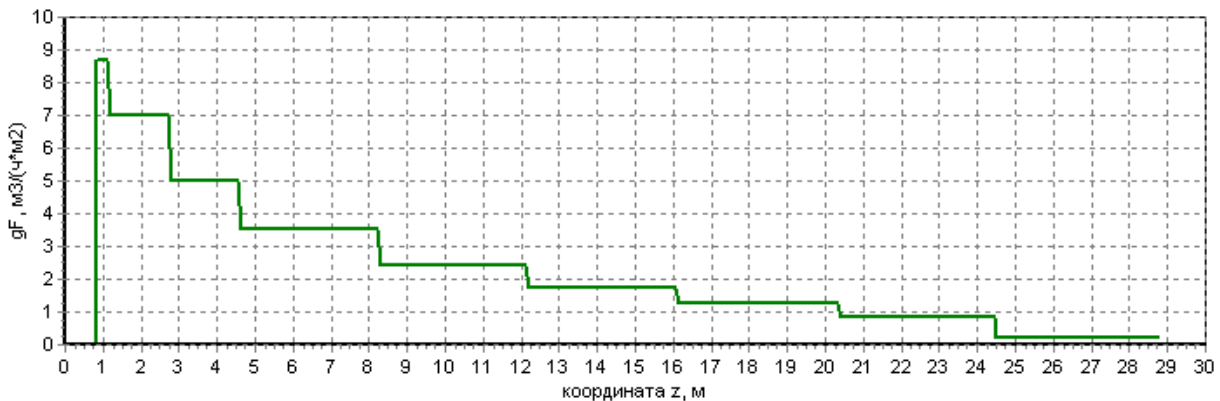


Рисунок 4 – Щільність зрошення поверхні малого радіуса зливка, швидкість витягування 1,1 м/хв

З часом за деяких причин значення параметрів коефіцієнта тепловіддачі можуть змінитися до значень:  $B = 30 \frac{Вт \cdot год}{м^3 \cdot ^\circ C}$ ,  $\alpha_0 = 100 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ . Через зміну параметрів коефіцієнта тепловіддачі з'являються суттєві відхилення дійсної температури поверхні зливка від еталонного профілю (рис. 5).

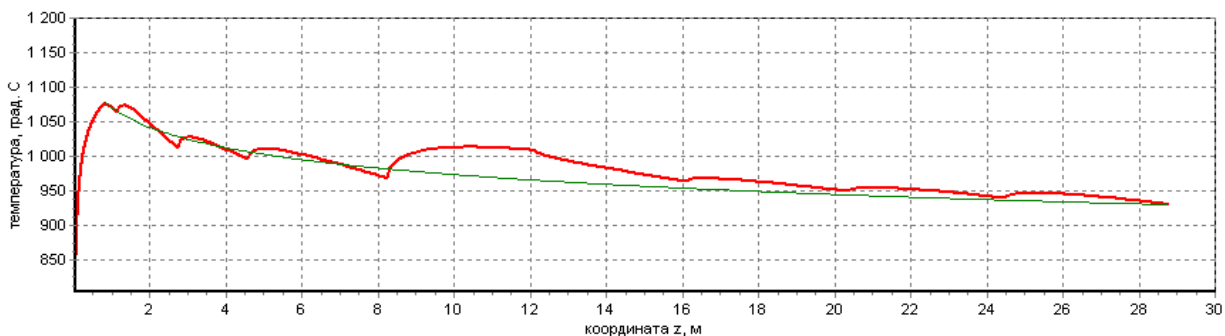


Рисунок 5 – Температура поверхні малого радіуса зливка після зміни параметрів коефіцієнта тепловіддачі, швидкість витягування 1,1 м/хв

В результаті ефективність охолодження у зоні від 8,4 м до 15,5 м недостатня, і це призводить до підвищення температури поверхні зливка в відповідних секціях.



## Машинобудування і зварювальне виробництво

Використовуючи розроблений метод, можна визначити значення параметрів коефіцієнта тепловіддачі у розглянутій секції ЗВО. В результаті застосування методу були отримані такі параметри:  $B = 29,97 \frac{Вт \cdot год}{м^3 \cdot ^\circ C}$ ,  $\alpha_0 = 100,14 \frac{Вт}{м^2 \cdot ^\circ C}$ . Значення параметрів  $B$  і  $\alpha_0$ , визначені за допомогою розробленого методу, з високою точністю відповідають дійсним значенням.

Після визначення нових значень параметрів  $B$  і  $\alpha_0$  було проведено коригування щільності зрошення у секціях ЗВО. Результат коригування наведений на рис. 6.

Дійсна температура поверхні зливка знову відповідає еталонному профілю з високою точністю. Таким чином, було здійснено адаптацію системи управління вторинним охолодженням зливка та усунене відхилення температури поверхні, викликане змінами параметрів коефіцієнта тепловіддачі.

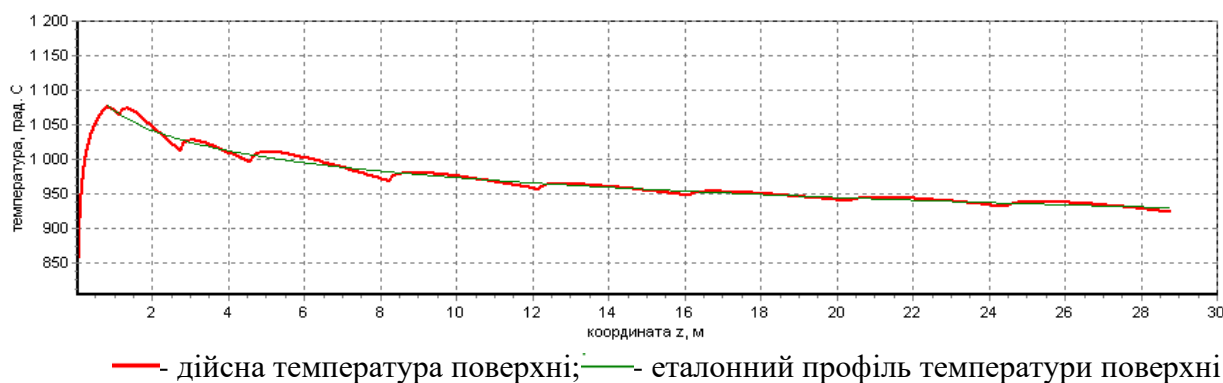


Рисунок 6 – Температура поверхні малого радіусу зливка після коригування режиму вторинного охолодження, швидкість витягування 1,1 м/хв.

### ВИСНОВКИ

Дослідження роботи вдосконаленої системи керування вторинним охолодженням злиwkів на моделі показало її високу ефективність. Запропоновані рішення дозволяють максимально наблизити дійсну температуру поверхні зливка до еталонного профілю, що підвищує якість продукції. Запропоновані методи мають оптимальну швидкість роботи, яка була досягнута завдяки застосуванню алгоритмів чисельного рішення рівняння теплопровідності.

#### Список використаних джерел:

1. Буланов, Л. В. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин, Е. П. Парфенов. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 449 с.
2. Нисковских, В. М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / В. М. Нисковских, С. Е. Карлинский, А. Д. Беренов. – М.: Металлургия, 1991. – 272 с.
3. Смирнов, А. Н. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев, С. В. Момот, Ю. Н. Белобров. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
4. Яухола, М. Динамическая модель системы охлаждения вторичной зоны для машины непрерывного литья заготовок / М. Яухола, Э. Кивеля, Ю. Конттинен, Э. Лайтинен, С. Лоухенкилти // Сталь. – 2005. – № 2. – С. 25–29.

5. Черевко, О. О. Пропозиції щодо вдосконалення САУ вторинним охолодженням МБЛЗ / О. О. Черевко, О. І. Шаповалов // Університетська наука – 2020 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2020. – Т. 2. – С. 247–248.

6. Черевко, О. О. Математичне моделювання процесу кристалізації злитка / О. О. Черевко, С. В. Щербаков // Наука та виробництво : зб. наук. праць. – 2020. – Вип. 23. – С. 421–429.

**Черевко Е.А., Щербаков С.В.**

### **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ПЛОТНОСТИ ОРОШЕНИЯ В СЕКЦИЯХ ЗОНЫ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МНЛЗ**

*Решение проблем с качеством слабов, изготавливаемых в условиях МНЛЗ, связано с настройкой и оптимизацией работы системы автоматического охлаждения в секциях ЗВО и корректировкой работы технологического оборудования. В настоящее время расчет оптимальных расходов воды на секции зон вторичного охлаждения представляет собой сложную задачу, решаемую комплексным подходом – от экспериментальных исследований и математического моделирования до применения современных методов управления с использованием микропроцессорных средств.*

*Для повышения качества функционирования динамической системы вторичного охлаждения (ДСВО) предлагается включить в ее состав средства контроля температуры поверхности слитка в ЗВО. Непосредственный контроль температуры поверхности слитка позволит повысить точность модели кристаллизации и улучшить работу ДСВО и системы мягкого обжатия, отвечающих за качество продукции.*

*Внесены предложения по дополнению ДСВО подсистемой коррекции плотности орошения в секциях ЗВО и подсистемой настройки моделей кристаллизации и вторичного охлаждения слитка.*

*Для исследования работы усовершенствованной системы управления созданы модели кристаллизации и охлаждения слитка в ЗВО, в основе которых лежит численное решение задачи нестационарной теплопроводности. Исследования показали, что предложенные новшества позволяют максимально приблизить действительную температуру поверхности слитка к эталонному профилю, что повышает качество получаемой продукции.*

**Ключевые слова.** МНЛЗ, слиток, вторичное охлаждение, плотность орошения, система автоматизированного управления, эксперимент, компьютерное моделирование.

**Cherevko O.O., Shcherbakov S.V.**

### **DEVELOPMENT OF THE METHOD OF OPERATIVE ADJUSTMENT OF PRECIPITATION DENSITY IN SECTIONS OF THE SECONDARY COOLING ZONE OF CONTINUOUS CASTING MACHINE**

*Solving problems with the quality of slabs manufactured in the conditions of the CCM is connected with the adjustment and optimization of the operation of the automatic cooling system in the sections of the secondary cooling zone (SCZ) and adjusting the operation of the technological equipment. Currently, the calculation of optimal water consumption for sections of secondary cooling zones is a difficult task, which is solved by the implementation of complex approaches - from experimental studies and mathematical modeling to the application of modern management methods using microprocessor tools.*

*In order to improve the quality of the functioning of the dynamic secondary cooling system (DSCS), it is proposed to include means of controlling the temperature of the ingot surface in the SCZ. Direct control of the temperature of the ingot surface will allow to increase the accuracy of the*

*crystallization model and improve the operation of the DSCS and the soft pressing system, which are responsible for product quality.*

*Proposals have been made to supplement the DSCS with a subsystem for adjusting the irrigation density in sections of the SCZ and a subsystem for setting models of crystallization and secondary cooling of the ingot.*

*To study the operation of the improved control system, models of crystallization and cooling of the ingot in the SCZ were created, which are based on the numerical solution of the problem of non-stationary thermal conductivity. Research have shown that the proposed innovations make it possible to bring the actual temperature of the ingot surface as close as possible to the reference profile, which increases the quality of the obtained products.*

**Keywords.** *continuous casting machine, ingot, secondary cooling, irrigation density, automated control system, experiment, computer simulation.*

*Стаття надійшла 20.05.2022 р.*

УДК 621.873.11

doi.org/10.31498/2522-9990252023286697

Крупко В.Г., Суглобов В.В.

### ЗАСТОСУВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ЛАНЦЮГОВИХ ПЕРЕДАЧ В ПРИВОДАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН

*Запропоновано конструкції хвильових ланцюгових передач, які дозволяють змінювати передатне відношення привода механізму з можливим вистосом веденого елемента або без нього, а також забезпечити імпульсний рух веденої ланки, наприклад робочого органу (ковша).*

**Ключові слова.** *Хвильові ланцюгові передачі, приводи технологічних машин.*

**Постановка проблеми.** В сучасних галузях господарського комплексу України при виконанні будівельних, землерийних, транспортно-складських та інших технологічних операцій, досить широке застосування знаходять машини і механізми, які забезпечують виконання технологічних операцій, а відповідно і рух робочих органів зі змінною, іноді пульсуючою швидкістю. Так, навантаження і транспортування насипних масових вантажів у будівництві, гірничій промисловості, пов'язане не тільки з підніманням і переміщенням вантажів, але і таких процесів, як руйнування зовнішнього середовища та заповнення і розвантаження робочих органів (ківшів, відвалів, грейферів), що потребує зміни швидкості для підвищення їх продуктивності. Тому розробка нових і удосконалення існуючих приводів виконавчих механізмів, з метою забезпечення широкого спектра швидкостей робочих органів технологічних машин, що дозволить зменшити енергоємність процесів є досить актуальною науково – технічною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В сучасних землерийних і підйомно-транспортних машинах вирішується різноманітні задачі по забезпеченню ефективної взаємодії робочих органів з зовнішнім середовищем. Прикладом застосування приводів з нерівномірним «пульсуючим» рухом виконавчого органу одноківшових екскаваторів, що забезпечує хвильова ланцюгова передача.

Хвильову передачу (рис. 1) можна назвати передачею із зовнішнім обкатуванням гнучкого зв'язку. Серед традиційних хвильових передач є аналогії [1,2], в яких ролики генератора хвиль мають зовнішнє розташування по відношенню до жорсткого колеса (циліндру). Передача, розглянута на (рис. 1) являється модифікацією існуючого механізму.