

*hardware and operational level is given. General statistical data of users of Internet resources are analyzed, basic verification procedures are considered: identification, authentication. The principles of forming and calculating the rating of a web resource user are considered. We have developed our own security system on the site, which allows you to identify a user on the Internet by analyzing information obtained in the process of user interaction with a web server. In the work, an elementary model of the system for forming the legitimacy rating of a web resource user was created, according to the data received from him for further analysis. The user of the web resource was identified using the usual methods of the Javascript programming language. When creating our own security system for identifying anonymous users, 15 of the most informative identifiers were selected that are requested from the user when trying to register on a web resource. The use of these methods makes it possible to increase the degree of reliability of user identification on the Internet, makes it possible to use the results for automated optimization of intrusion detection systems or anomalous actions when setting an adaptive security threshold, as well as for identifying a potential attacker on the Internet.*

**Key words:** *Internet, information systems, user identification, user rating formation, data analysis, information security.*

Рецензент: канд. техн. наук, ДВНЗ «ПДТУ» Кривенко О. В.  
Стаття надійшла 15.12.2020 р.

УДК 669.162.22

Щербаков С. В., Черевко О. О.

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЗЛИТКУ

*В умовах сучасного виробництва велика увага приділяється питанням підвищення якості злитків, виготовлених за технологією безперервного лиття, а також питанням надійності та безпеки роботи обладнання. На якість відливої заготовки впливає комплекс різних факторів, основними з яких є конструктивні особливості основних вузлів МБЛЗ і наявність систем автоматичного управління.*

*Ключову роль у забезпеченні високої якості поверхні та внутрішньої структури злитка відіграє робота системи автоматичного управління зоною вторинного охолодження. На сучасних МБЛЗ застосовуються динамічні системи вторинного охолодження (ДСВО). Сутність даних систем полягає в можливості корекції параметрів зони вторинного охолодження на основі інформації про поточний тепловий стан злитка, яку ДСВО отримує в режимі реального часу. Необхідність отримання достовірної інформації про поточний стан злитка представляє головну складність при проектуванні ДСВО. На даний час не існує методу, який дозволяє безперервно контролювати температуру внутрішніх точок злитка, і розробка такого методу в найближчому майбутньому не представляється можливою. Тому, для контролю температурного стану злитка в ДСВО використовуються математичні моделі, які ґрунтуються на чисельному рішенні задачі нестационарної теплопровідності.*

*В роботі проведений аналіз існуючої системи управління вторинним охолодженням злитка на МБЛЗ № 6 ПАТ «МК «Азовсталь». Розроблено модель кристалізації злитка, яка*

дозволяє аналізувати профіль температури поверхні та внутрішнє температурне поле. Порівняння результатів, отриманих при використанні моделі, з даними технічної документації МБЛЗ підтвердило достатню адекватність моделі та можливість подальшого її використання в системах управління вторинним охолодженням злитків.

**Ключові слова:** МБЛЗ, злиток, кристалізація, вторинне охолодження, система автоматизованого управління, експеримент, комп'ютерне моделювання.

**Постановка проблеми.** Головним фактором, що визначає якість суцільнолитих злитків, є організація режимів вторинного охолодження. У зв'язку зі складністю реалізації методів безперервного контролю ряду параметрів технологічного процесу, для отримання достовірної інформації про поточний стан злитка використовуються математичні моделі.

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

В основі більшості розроблених останнім часом систем управління вторинним охолодженням використовуються динамічні моделі температурного поля суцільнолитої заготовки. Наприклад, модель кристалізації злитка DYNCOOL, що використовується в ДСВО фірми «Раутаруккі» (Фінляндія) [3], розраховує температурний профіль заготовки, товщину кірки і витрати води на вторинне охолодження. Управління витратами охолоджуючої води для кожної із секцій ЗВО проводиться таким чином, щоб мінімізувати відхилення розрахункового профілю температури поверхні злитка від заданого. Недоліком даної ДСВО є відсутність безпосереднього контролю температури поверхні злитка. Модель кристалізації включає в себе ряд констант, значення яких можуть бути визначені тільки в ході експериментів. Якщо ж в моделі задані неточні значення констант, то результати розрахунків, одержані за її допомогою, будуть неадекватні реальному процесу, що не дозволить досягти високої якості управління вторинним охолодженням.

Математична модель кристалізації злитка на МБЛЗ являє собою сукупність рівнянь, що описують теплові процеси всередині злитка, а також теплообмін між злитком і навколишнім середовищем [1]. Всі відомі моделі кристалізації ґрунтуються на рішенні нестационарного рівняння теплопровідності [2 – 4, 8].

Через нелінійність рівняння теплопровідності його точне аналітичне рішення не представляється можливим [1 – 4]. Для вирішення рівняння теплопровідності використовують чисельні методи сіток. Аналіз інформації, наведеної в [5, 6], показав, що для вирішення задачі кристалізації злитка на МБЛЗ найкраще підходить неявна різницева схема завдяки її збіжності з точним рішенням навіть у тому випадку, коли коефіцієнти рівняння теплопровідності залежать від температури, що властиво задачі кристалізації злитка.

Таким чином, пошук оптимального алгоритму моделювання з подальшою практичною реалізацією має важливу роль в комплексній системі автоматизації МБЛЗ.

**Метою даної роботи** є розробка математичної моделі кристалізації злитка для удосконалення системи динамічного управління охолодженням сляба в ЗВО і підвищення якості відлитих заготовок.

**Виклад основного матеріалу.** Процес кристалізації злитка описується диференціальним рівнянням теплопровідності з внутрішніми джерелами тепла, особливістю якого є облік

теплоти, що виділяється при кристалізації.

Диференційне рівняння нестационарної теплопровідності з урахуванням ефективної теплоємності  $C_E(T)$  і ефективної теплопровідності  $\lambda_E(T)$  має вигляд:

$$\rho(T)C_E(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_E(T)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

де  $T$  – температура металу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho(T)$  – щільність металу, що залежить від температури,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;  $C_E(T)$  – ефективна теплоємність металу, яка враховує виділення теплоти при кристалізації,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$ ;  $\tau$  – час,  $\text{с}$ ;  $\lambda_E(T)$  – коефіцієнт ефективної теплопровідності, який враховує явище конвективного теплопереносу в рідкій фазі,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .

Значення ефективної теплоємності та ефективної теплопровідності визначаються за виразами (2) і (3) відповідно:

$$C_E(T) = \begin{cases} C_m(T), \text{ при } T < T_c \\ \frac{C_m(T) + C_p(T)}{2} + \frac{q_{кр}}{T_l - T_c}, \text{ при } T_l \leq T \leq T_c \\ C_p(T), \text{ при } T > T_l, \end{cases} \quad (2)$$

де  $C_m(T)$  – теплоємність твердого металу,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$ ;  $C_p(T)$  – теплоємність рідкого розплаву,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$ ;  $T_l$  – температура ліквідусу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  – температура солідусу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$$\lambda_E(T) = \begin{cases} \lambda_m(T), \text{ при } T < T_c \\ \lambda_m(T) \cdot \psi + \lambda_p(T) \cdot (1 - \psi), \text{ при } T_l \leq T \leq T_c \\ \lambda_p(T), \text{ при } T > T_l, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\lambda_m(T)$  – теплопровідність твердого металу,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ ;  $\lambda_p(T)$  – теплопровідність рідкого металу,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ ;  $\psi$  – відносна кількість твердої фази;  $T_l$  – температура ліквідусу,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  – температура солідусу,  $^{\circ}\text{C}$ .

Значення щільності та теплопровідності сталі при різній температурі взяті з бази даних експериментів на МБЛЗ № 6. Відомості про залежність теплоємності сталі від температури в базі даних відсутні, тому були використані дані, наведені в джерелі [2].

Обмеження на розрахункову область задачі нестационарної теплопровідності представлені системою нерівностей:

$$\begin{cases} 0 \leq x \leq Lx; \\ 0 \leq \tau \leq t_p, \end{cases} \quad (4)$$

де  $L_x$  – товщина злитка,  $\text{м}$ ;  $t_p$  – час розрахунку.

У загальному випадку температура злитка є функцією трьох координат і часу:  $T = T(x, y, z, \tau)$ . Вісі  $x$  та  $y$  розташовуються в поперечному перетині злитка, вісь  $z$  збігається з напрямком витягування злитка. Для широких слябів, співвідношення сторін яких більше 4, теплообміном через вузькі грані можна знехтувати [1]. Для МБЛЗ № 6 співвідношення сторін сляба знаходиться в діапазоні 5,56 – 9,55.

Рух злитка моделюється шляхом просування контрольного перетину уздовж вісі  $z$ . Таким чином, для широкого сляба задача теплопровідності може бути зведена до локально-одновимірної, яка включає в себе одновимірну задачу теплопровідності з моделюванням просування контрольного перетину злитка уздовж технологічної лінії МБЛЗ. Рішення задачі теплопровідності для контрольного перетину відбувається до тих пір, поки він не покине межі ЗВО. Час розрахунку буде залежати від швидкості просування контрольного перетину.

Початкові умови характеризують розподіл температур у початковий момент часу:

$$T(x, 0) = T_0, \quad (5)$$

де  $T_0$  – температура металу, що надходить з промковша.

Граничні умови характеризують процес теплообміну на поверхні злитка.

Для кристалізатора задаються граничні умови II-го роду:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = -\frac{q_1(\tau)}{\lambda_E(T)}; \\ \frac{\partial T(Lx, \tau)}{\partial x} = -\frac{q_2(\tau)}{\lambda_E(T)}, \end{cases} \quad (6)$$

де  $q_1(\tau)$  і  $q_2(\tau)$  – щільності теплових потоків для граней великого ( $R$ ) і малого ( $r$ ) радіусів злитка відповідно,  $\frac{Bm}{m^2}$ .

Щільності теплових потоків в кристалізаторі можуть бути знайдені з виразу:

$$q(z) = \frac{1}{2} Av^n (L_k^a)^{0,5} z^{-0,5}, \quad (7)$$

де  $v$  – швидкість витягування злитка,  $m/xv$ ;  $A = 948,26$ ;  $n = 0,37$  – постійні коефіцієнти, визначені дослідним шляхом за методикою, наведеною в [1];  $z$  – координата перетину злитка в кристалізаторі,  $m$ ;  $L_k^a$  – активна довжина кристалізатора,  $m$ .

Для ЗВО задаються граничні умови I-го або III-го роду. Граничні умови I-го роду мають вигляд:

$$\begin{cases} T(0, \tau) = \varphi_1(\tau); \\ T(Lx, \tau) = \varphi_2(\tau), \end{cases} \quad (8)$$

де  $\varphi_1(\tau)$  і  $\varphi_2(\tau)$  – відомі функції температури на поверхні злитка,  $^{\circ}C$ ; з урахуванням щільності теплових потоків для граней великого ( $R$ ) і малого ( $r$ ) радіусів злитка,  $q_3(\tau)$  і  $q_4(\tau)$  відповідно:

$$\begin{cases} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = -\frac{q_3(\tau)}{\lambda_E(T)}; \\ \frac{\partial T(Lx, \tau)}{\partial x} = -\frac{q_4(\tau)}{\lambda_E(T)}. \end{cases} \quad (9)$$

Щільності теплових потоків в ЗВО можуть бути знайдені з виразу:

$$q = \alpha \cdot (T_n - T_e), \quad (10)$$

де  $T_n$  – температура поверхні злитка,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_e$  – температура охолоджуючої води,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\alpha = \alpha_{\text{вод}} + \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{випр}}$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі при охолодженні водою, конвективному теплообміні з навколишнім середовищем і теплообміні випромінюванням,  
 $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ .

Після підстановки (10) в (9) і перетворень отримуємо наступну систему:

$$\begin{cases} \lambda_E(T) \cdot \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \alpha_1(\tau) \cdot T(0, \tau) = \alpha_1(\tau) \cdot T_e; \\ \lambda_E(T) \cdot \frac{\partial T(L_x, \tau)}{\partial x} + \alpha_2(\tau) \cdot T(L_x, \tau) = \alpha_2(\tau) \cdot T_e, \end{cases} \quad (11)$$

де  $\alpha_1(\tau)$  і  $\alpha_2(\tau)$  – коефіцієнти тепловіддачі для граней великого ( $R$ ) і малого ( $r$ ) радіусів злитка відповідно,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ .

Рівняння системи (11) є лінійними комбінаціями температури на поверхні злитка та її першої похідної, тобто це граничні умови III-го роду.

Таким чином, математична модель кристалізації злитка включає в себе рівняння і нерівності: (1) – (8), (10), (11). Рішення даної системи дозволяє визначити температурне поле в будь-який момент часу від початку формування оболонки на рівні меніска металу в кристалізаторі, а також дослідити вплив зовнішніх умов на тепловий режим формування безперервного злитка.

Внаслідок нелінійності рівняння теплопровідності (1) точне аналітичне рішення задачі кристалізації злитка на МБЛЗ неможливо. Для вирішення задачі кристалізації використовуються чисельні методи сіток. У джерелах [1, 2] наводиться метод вирішення задачі теплопровідності за допомогою явної різницевої схеми. Умова стійкості явної схеми накладає жорсткі обмеження на крок за часом, що є її недоліком. При зменшенні кроку по координаті для підвищення точності розрахунків потрібно зменшувати і крок за часом, що призводить до різкого збільшення обсягу обчислень, а, отже, і часу на їх виконання. Тому домогтися високої точності рішення за прийнятною тривалістю розрахунку за допомогою явної різницевої схеми неможливо.

Задача теплопровідності вирішувалася за допомогою неявної різницевої схеми [5, 6]. Неявна схема є абсолютно стійкою і дозволяє вести розрахунок при будь-яких значеннях кроку по координаті і за часом.

Розроблено комп'ютерну модель кристалізації злитка на МБЛЗ, що дозволяє визначати значення температури в будь-якій точці поздовжнього перетину злитка для будь-якого моменту часу від початку кристалізації, а також отримувати інші дані, необхідні для аналізу процесу кристалізації злитка. Передбачено побудову графіків ліній ліквідусу і солідусу, графіків теплових потоків на поверхні злитка для великого і малого радіусів, графіків щільності, ефективних теплоємності та теплопровідності сталі в залежності від температури. Виводяться довжини рідкої та двофазної зон злитка. Модель дозволяє обирати тип граничних умов для ЗВО (I-го або III-го роду).

У розробленій моделі кристалізації злитка застосовується непрямий метод обліку

процесів гідродинамічного перемішування розплаву в рідкому ядрі злитка. Для обліку конвективного теплообміну в рідкій фазі вводиться коефіцієнт  $k$ , який показує, у скільки разів ефективна теплопровідність рідкої сталі (з урахуванням конвекції) перевершує теплопровідність сталі без урахування конвекції:

$$\lambda_E(T) = k \cdot \lambda_p(T), \quad (12)$$

де  $k$  – коефіцієнт збільшення теплопровідності рідкої фази за рахунок конвективних потоків;  $\lambda_p(T)$  – теплопровідність розплаву при  $T > T_n$  без урахування конвективного теплообміну.

Адекватність моделі перевірялася шляхом порівняння значень довжини двофазної зони для ряду швидкостей витягування злитка, які розраховуються за допомогою моделі, з даними, що вказуються в технічній документації МБЛЗ № 6.

Спочатку при побудові моделі було прийнято значення  $k = 1$ , тобто теплообмін за рахунок конвекції в рідкому ядрі злитка не враховувався. Графік залежності довжини двофазної зони злитка від швидкості витягування, отриманий з використанням моделі і побудований за даними з документації МБЛЗ, наводиться на рис. 1. Видно, що присутня велика різниця між результатами моделювання і даними з технічної документації (максимальна розбіжність становить 3,850 м, мінімальна – 3,269 м). Неточності в описі моделлю процесу кристалізації злитка обумовлені невірним завданням значення ефективної теплопровідності рідкого металу (в моделі не враховується конвективний теплообмін).

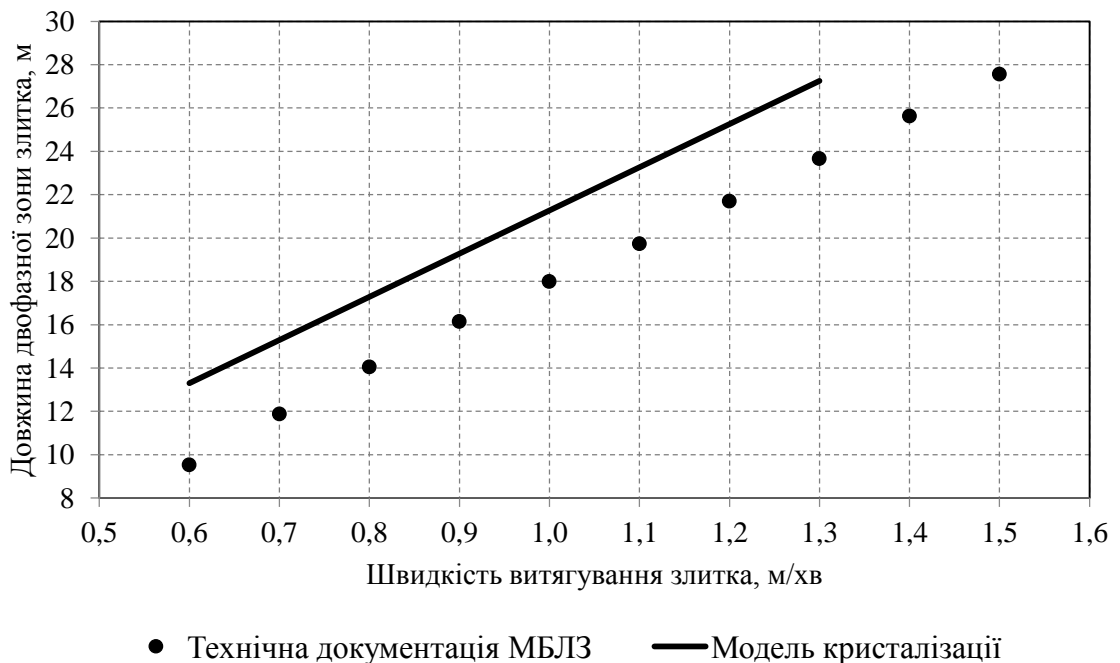


Рисунок 1 – Залежність довжини двофазної зони від швидкості витягування злитка

Для визначення значення коефіцієнта  $k$ , при якому різниця між результатами, отриманими з використанням моделі, і даними з документації МБЛЗ буде мінімальною, обчислимо функцію похибки, що характеризує точність моделі:



## Інформаційні технології

$$F_{\text{похиб}}(k) = \sum_{i=1}^N (L_{\text{мод}}(k) - L_{\text{табл}})^2, \quad (13)$$

де  $F_{\text{похиб}}(k)$  – значення функції похибки;  $k$  – коефіцієнт, що враховує конвективний теплообмін;  $N$  – кількість експериментів (кількість швидкостей витягування, для яких наводяться дані в документації МБЛЗ);  $L_{\text{мод}}(k)$  – довжина двофазної зони, обчислена за допомогою моделі,  $m$ ;  $L_{\text{табл}}$  – довжина двофазної зони згідно з документацією МБЛЗ,  $m$ .

Змінною функції є коефіцієнт моделі  $k$ . Отже, задача пошуку значення коефіцієнта  $k$ , при якому модель буде найбільш точно описувати дані з документації, зводиться до задачі мінімізації функції похибки (цільової функції). Для мінімізації функції був використаний метод «золотого перетину», який має високу швидкість збіжності і не вимагає знаходження похідних цільової функції [7].

В результаті мінімізації цільової функції було знайдено значення  $k = 1,499$ , при цьому величина функції похибки склала  $F_{\text{похиб}}(k) = 4,470$  одиниць.

Графік залежності довжини двофазної зони злитка від швидкості витягування, отриманий з використанням моделі при значенні коефіцієнта  $k = 1,499$  і побудований за даними з документації МБЛЗ, наводиться на рис. 2. Видно, що знайдене значення коефіцієнта  $k$  дозволило досягти високого ступеня відповідності між результатами моделі і експериментальними даними (максимальна розбіжність становить 1,483 м, мінімальна – 0 м). Отримана модель адекватно описує процес кристалізації злитка і придатна для використання в системі динамічного управління охолодженням сляба в ЗВО.

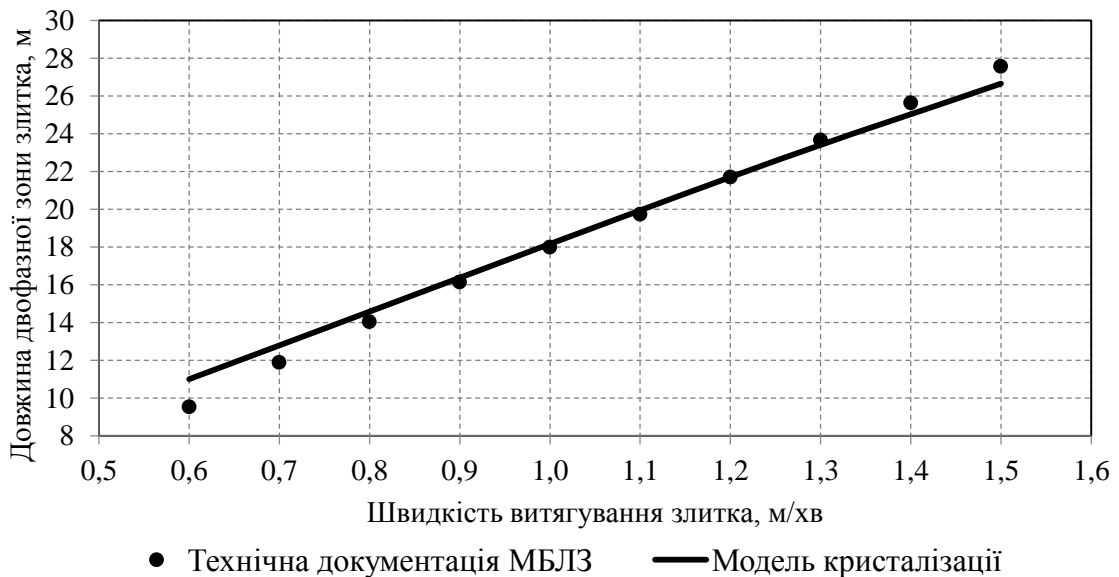


Рисунок 2 – Залежність довжини двофазної зони від швидкості витягування злитка для уточненого значення коефіцієнта  $k$

### ВИСНОВКИ

Розроблена модель кристалізації злитка на МБЛЗ дозволяє визначити характер і ступінь впливу на процес кристалізації різних зовнішніх і внутрішніх факторів: теплообміну

між злитком і кристалізатором, режимів вторинного охолодження злитка, швидкості витягування, а також фізичних властивостей сталі.

Перевірка адекватності моделі виконана порівнянням результатів, одержаних при її використанні, з даними технічної документації МБЛЗ. Виявлені в ході перевірки розбіжності зведені до мінімуму шляхом корекції значення ефективної теплопровідності сталі.

Запропонована модель досить точно описує процес кристалізації. Інформація про тепловий стан злитка, отримана в результаті моделювання, може бути використана в роботі систем вторинного охолодження і м'якого обтиску з метою підвищення якості внутрішньої структури злитка і зменшення кількості дефектів на його поверхні.

### *Перелік використаних джерел:*

1. *Емельянов, В. А.* Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок / *В. А. Емельянов.* – М. : Metallurgiya, 1988. – 143 с.
2. *Самойлович, Ю. А.* Тепловые процессы при непрерывном литье стали / *Ю. А. Самойлович, С. А. Крулевецкий, В. А. Горяинов, З. К. Кабаков.* – М. : Metallurgiya, 1982. – 152 с.
3. *Буланов, Л. В.* Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / *Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин, Е. П. Парфенов.* – Екатеринбург: Марат, 2004. – 449 с.
4. *Нисковских, В. М.* Машины непрерывного литья слывовых заготовок / *В. М. Нисковских, С. Е. Карлинский, А. Д. Беренов.* – М.: Metallurgiya, 1991. – 272 с.
5. *Калиткин, Н. Н.* Численные методы : учеб. пособие / *Н. Н. Калиткин.* – СПб.: БХВ–Петербург, 2011. – 592 с.
6. *Самарский, А. А.* Численные методы математической физики / *А. А. Самарский, А. В. Гулин.* – 2-е изд. – М. : Научный мир, 2003. – 316 с.
7. *Пантелеев, А. В.* Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие / *А. В. Пантелеев, Т. А. Летова.* – М. : Высш. шк., 2005. – 544 с.
8. *Глинков, Г. М.* АСУТП в черной металлургии : учебник для вузов / *Г. М. Глинков, В. А. Маковский.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgiya, 1999. – 310 с.

**Щербаков С. В., Черевко Е. А.**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛИТКА**

*В настоящее время большое внимание уделяется вопросам повышения качества слитков, получаемых на МНЛЗ, а также вопросам надежности и безопасности работы оборудования. Качество отливаемой заготовки зависит от комплекса различных факторов, основными из которых являются конструктивные особенности основных узлов МНЛЗ и наличие систем автоматического управления.*

*Ключевую роль в обеспечении высокого качества поверхности и внутренней структуры слитка играет работа системы автоматического управления зоной вторичного охлаждения. На современных МНЛЗ применяются динамические системы вторичного охлаждения (ДСВО). Сущность данных систем заключается в возможности коррекции параметров зоны на основе информации о текущем тепловом состоянии слитка, которую*



ДСВО получает в режиме реального времени. Необходимость получения достоверной информации о текущем состоянии слитка является главной сложностью при проектировании ДСВО. В настоящее время не существует метода, позволяющего непрерывно контролировать температуру внутренних точек слитка, и разработка такого метода в ближайшем будущем не представляется возможной. Поэтому, для контроля температурного состояния слитка в ДСВО используются математические модели, которые основываются на численном решении задачи нестационарной теплопроводности.

В работе произведен анализ существующей системы управления вторичным охлаждением слитка на МНЛЗ № 6 ЧАО «МК «Азовсталь». Разработана модель кристаллизации, позволяющая анализировать профиль температуры поверхности и температурное поле внутри слитка. Сравнение результатов, полученных при использовании модели, с данными технической документации МНЛЗ показало ее достаточную адекватность и возможность дальнейшего использования в системе управления вторичным охлаждением слитков.

**Ключевые слова:** МНЛЗ, слиток, кристаллизация, вторичное охлаждение, система автоматизированного управления, эксперимент, компьютерное моделирование.

**Shcherbakov S. V., Cherevko E. A.**

### MATHEMATICAL MODELING OF INGOT CRYSTALLIZATION PROCESS

Currently, much attention is paid to improving the quality of ingots obtained at the continuous casting machine (CCM), as well as issues of reliability and safety of equipment operation. The quality of the cast billet depends on a complex of various factors, the main of which are the design features of the main CCM units and the presence of automatic control systems.

The key role in ensuring high quality of the surface and internal structure of the ingot is played by the operation of the automatic control system of the secondary cooling zone. At modern continuous casting machines, dynamic secondary cooling systems (DSCS) are used. The essence of these systems is the possibility of correcting zone parameters based on information about the current thermal state of the ingot, which DSCS receives in real time. The need to obtain reliable information about the current state of the ingot is the main difficulty in the design of DSCS. Currently, there is no method that allows you to continuously monitor the temperature of the inner points of the ingot, and the development of such a method in the near future is not possible. Therefore, to control the temperature state of the ingot in DSCS, mathematical models are used that are based on the numerical solution of the problem of unsteady heat conduction.

The work analyzes the existing control system for secondary cooling of the ingot at continuous casting machine No. 6 of PJSC «Azovstal Iron & Steel Works». A crystallization model has been developed that allows analyzing the surface temperature profile and the temperature field inside the ingot. Comparison of the results obtained when using the model with the data of the technical documentation of the continuous casting machine showed its sufficient adequacy and the possibility of further use in the control system for the secondary cooling of ingots.

**Keywords:** continuous casting machine, ingot, crystallization, secondary cooling, computer-aided control system, experiment, computer simulation

Рецензент: канд. техн. наук, доц. В. П. Кравченко

**Стаття надійшла**