

УДК 669.18.046.518.001.57

Зубко А. А., Койфман О. О.

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛООБМІНУ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ОХОЛОДЖЕННЯМ ЗЛИТКУ У КРИСТАЛІЗАТОРІ МБРЗ

Виконано аналіз існуючих моделей оцінки теплового стану кристалізатора, діагностики теплових процесів і охолодження злитка. На підставі вивчених методів була поставлена задача запропонувати можливість управління охолодженням злитка в кристалізаторі МБРЗ в реальному часі шляхом розрахунку значення витрати води на підставі математичної моделі з підтримкою певного значення перепаду температур води на вході виході з кристалізатора, з урахуванням корекції за рівнем металу і швидкості розливання.

Наводиться алгоритм розрахунку значень витрати води на кристалізатор, заснований на виконанні двох умов: температура на виході з кристалізатора не повинна перевищувати 45 °С; швидкість руху води в каналах стінок кристалізатора повинна бути не менше 5 м/с. На підставі запропонованого алгоритму виконано експериментальний розрахунок значень витрати води з урахуванням реальних виробничих умов: перетином злитка, діапазоном номінальних значень рівня металу і швидкості розливання. Наводяться графік залежності значень витрати води від рівня металу, при різних швидкостях розливання. Побудований графік залежності витрати води від швидкості розливання для різних значень перепаду температур води на вході та виході з кристалізатора. Зроблено порівняльний аналіз розрахункових значень витрат води з технологічними. Беручи до уваги дві необхідні умови алгоритму розрахунку, а також реальні виробничі значення витрати води - вибрано оптимальне рекомендоване значення перепаду температур.

За результатами дослідження можна стверджувати, що дана математична модель може функціонувати в підпрограмі в АСУ, яка регулює витрату води на основі даних про перепад температур, підтримки його постійного значення з корекцією за швидкістю розливання і рівню в кристалізаторі. Використання запропонованої системи дозволить на практиці ефективно і оптимально управляти охолодженням кристалізатора, а також уникнути зайвих перевитрат води.

Ключові слова: МБРЗ, кристалізатор, математична модель, різниця температур, управління, витрата води, рівень металу, швидкість розливання.

Постановка проблеми

Кристалізатор є одним з ключових вузлів машини безперервного розливання заготовок (МБРЗ), ефективність якого відіграє значну роль на якість та собівартість слябів, що розливають на МБРЗ. Процес теплообміну між сформованим злитком та охолоджувальною водою є визначним: від того, наскільки ефективно організований цей процес, залежить товщина і міцність кірки злитка на виході з кристалізатора, вірогідність появи тріщин в оболонці, термін служби мідних стінок кристалізатора. В даний час в більшій частині випадків на виробництві у системі автоматичного керування МБРЗ математична модель теплопередачі між заготовкою і кристалізатором не використовується, а регулювання здійснюється персоналом шляхом ручного виставлення значення витрати води на

охолодження стінок кристалізатора. Внаслідок цього, не здійснюється ефективно та оперативне управління теплопередачею від злитка до кристалізатора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автор [1] в своїй роботі пропонує для ефективного процесу охолодження злитка в кристалізаторі машини безперервного розливання заготовок вирішити такі завдання:

1) побудувати тривимірну нестационарну математичну модель затвердіння безперервно-литого злитка і водяного охолодження стінки кристалізатора, з урахуванням теплофізичних процесів;

2) адаптувати моделі, з урахуванням впливу вибору шлакоутворюючих сумішей (ШОС) і, отже, утвореного гарнісажу на теплові потоки;

3) апробувати розроблену математичну модель, використовуючи експериментальні дані, наведені в літературі;

4) вивчити вплив різних чинників на теплові поля в зливку та стінці кристалізатора;

5) обґрунтувати вибір теплотехнічних режимів лиття.

В роботі [2] розроблено методи вивчення теплообміну між злитком і охолоджуючим обладнанням в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження МБРЗ, розроблено принципи раціонального охолодження злитка при динамічних режимах розливання. Було проведено дослідження теплообміну в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження в промислових умовах, проведена обробка отриманих експериментальних даних.

Автор [3] в статті розглядає спосіб одночасного вимірювання щільності та рівня рідкого металу в кристалізаторах МБРЗ, що забезпечує прецизійне вимірювання і регулювання. Представлений спосіб двопараметричного вимірювання реалізується за допомогою радіоізотопних датчиків.

Проаналізовано підходи до діагностики теплових процесів в кристалізаторі [4], в основі яких лежить оперативне відстеження зміни значень таких величин як: середня щільність теплового потоку з поверхні заготовки в кристалізаторі, середнє значення коефіцієнта тепловіддачі в кристалізаторі, середній коефіцієнт тепловіддачі від кірки заготовки до внутрішньої поверхні гільзи кристалізатора і ефективну товщину газового зазору. Показаний приклад кількісного визначення цих величин для сталого режиму розливання заготовки перерізом 120x120 мм для умов одного з металургійних підприємств Донбасу.

Автори [5] розглядають в своїй роботі застосування математичної моделі для управління процесом охолодження злитка в зоні вторинного охолодження з урахуванням процесу його кристалізації в реальному часі шляхом розрахунку параметрів кристалізації і кількості води на секції.

Метою дослідження є обґрунтування можливості застосування розрахунку значення витрати води на підставі математичної моделі, з підтриманням значення перепаду температур та з корекцією по рівню металу і швидкості розливання у системі управління охолодженням злитку у кристалізаторі МБРЗ.

Основний матеріал дослідження

Об'єктом дослідження є кристалізатор машини безперервного лиття заготовок одного з металургійних підприємств України.

Для аналізу теплової роботи кристалізатора і при проектуванні нового кристалізатора необхідно розрахувати витрати охолоджуючої води, швидкості руху води в каналах робочих стінок кристалізатора, а також визначити температуру поверхні злитка і товщину твердої

скоринки на виході з кристалізатора. Витрату та швидкість руху охолоджуючої води необхідно розраховувати при номінальній швидкості витягування. Для цієї ж швидкості витягування заготовки визначають температуру поверхні злитка і товщину твердої скоринки на виході з кристалізатора.

Одним з основних показників, що характеризує систему охолодження кристалізатора, є витрата охолоджуючої води. Перед тим як виконати розрахунок необхідно вибрати діаметр каналів і визначити їх число. Розраховане значення витрати води має об'єднувати в собі виконання двох умов:

1) температура води після кристалізатора повинна бути менше 45 °С для того, щоб уникнути відкладення розчинених в ній солей [6];

2) швидкість руху води в каналах стінок кристалізатора повинна бути більше 5 м/с для виключення утворення застійних зон з локальним перегрівом [7].

За основу взята методика розрахунку параметрів МБРЗ [8] з урахуванням умов обраної машини безперервного розливання заготовок.

Витрата води, що забезпечує виконання першої умови, визначається наступним чином.

Спочатку визначаються початкові дані:

- значення температури води на вході в кристалізатор 20 - 30 °С;

- значення температури води на виході з кристалізатора 40 - 45 °С;

- значення перепаду температур води в кристалізаторі Δt_b , °С;

- різниця температур між температурою рідкого металу і температурою поверхні заготовки $\Delta t = 350 - 400$ °С;

- середня товщина оболонки затверділого металу в кристалізаторі ξ_k за рівнянням:

$$\xi_k = k * \sqrt{\frac{\tau_{кр}}{2}} = k * \sqrt{\frac{h_{кр}}{2 * v_p}} \quad (1)$$

де ξ_k – середня товщина скоринки металу в кристалізаторі, мм;

$\tau_{кр}$ – тривалість затвердіння зливку у кристалізаторі, хв;

k – коефіцієнт затвердіння, який для спокійної сталі в залежності від її складу і умови затвердіння змінюється в межах 24 – 28 мм/хв^{1/2};

$h_{кр}$ – робоча (активна) висота кристалізатора, тобто рівень металу в кристалізаторі з урахуванням недоливу, м;

v_p – робоча швидкість витягування, м/хв.

Після цього, за типовою формулою, обчислюється середня щільність теплового потоку від заготовки до кристалізатору

$$Q = \lambda * \frac{\Delta t}{\xi_k} \quad (2)$$

де Q – середній тепловий потік, Вт/м²;

λ – коефіцієнт теплопровідності затверділого металу, для вуглецевої сталі приймаємо $\lambda = 30$ Вт/(м·К);

Δt – середній перепад температури між температурою рідкого металу і температурою поверхні заготовки, приймаємо 380 °С, для вуглецевої сталі.

Витрата води, що забезпечує прийняту температуру її на виході з кристалізатора обчислюється за виразом [7]:

Інформаційні технології

$$G_1 = \frac{3600 * Q * F_{кр}}{\rho_B * C_B * \Delta t_B} \quad (3)$$

де G_1 – витрата води на кристалізатор за розглянутій умові, м³/ч;
 ρ_B – щільність води, кг/м³;
 C_B – питома теплоємність води, яку при температурі 20 – 40 ° С можна прийняти рівною 4178 Дж/(кг·К);
 Δt_B – перепад температур води в кристалізаторі, °С;
 $F_{кр}$ – площа поверхні кристалізатора (м²), яка сприймає тепловий потік, визначається з виразу:

$$F_{кр} = 2 * (A_{кр} + B_{кр}) * H_{кр} \quad (4)$$

де $H_{кр}$ – висота кристалізатора (0,9), м;
 $A_{кр}, B_{кр}$ – відстань між протилежними стінками кристалізатора, м.

Витрата води, згідно якої забезпечує виконання другої умови – яка забезпечує задану швидкість її руху в каналах стінок кристалізатора, визначається за формулою [7]:

$$G_2 = 900 * \pi * d^2 * v_B * m \quad (5)$$

де G_2 – витрата води на кристалізатор, м³/ч;
 d – діаметр каналу (0,025 м), м;
 v_B – швидкість руху води (не менше 5 м/с), м/с;
 m – кількість каналів, яке визначається з виразу:

$$m = \frac{P_{кр}}{d+h} + 1 \quad (6)$$

де d – діаметр каналу, м;
 h – відстань між каналами, м (50 мм);
 $P_{кр}$ – середній периметр кристалізатора (м), який визначається з виразу

$$P = 2 * (A_{кр} + B_{кр}) * L_{кр} \quad (7)$$

де $L_{кр}$ – товщина стінки кристалізатора (80 мм).

Після обчислення необхідної витрати води, виходячи з першої і другої умови, приймається більша з них.

Для дослідження запропонованої моделі побудуємо залежності основних параметрів, проаналізуємо реальність і адекватність отриманих значень витрати, порівняємо з практичними використовуваними витратами води. Умови дослідження: перетин кристалізатору 1550 на 200 мм, вуглецева сталь, діапазон рівня металу 65-80 см, діапазон швидкості розливання 0,2 – 1,6 м/хв.

Побудуємо графік залежності витрати води від рівня металу, для робочого діапазону швидкості розливання $v=0,8-1,4$ м/хв відповідно до технологічної інструкції для даного перетину.

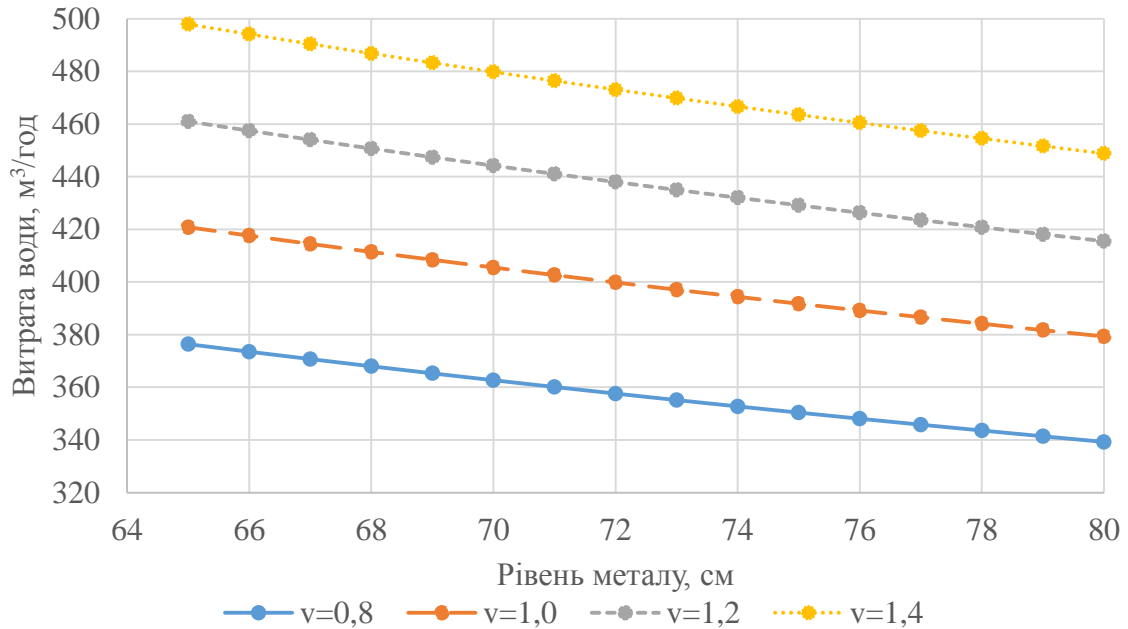


Рисунок 1 – Залежність витрати води від рівня металу

На графіках (рис. 1) видно зворотно лінійну залежність, що обумовлено залежністю між тепловим потоком і товщиною скоринки металу з формули (2): чим вище рівень металу, тим більше середнє значення товщини скоринки.

Більш цікавим для нас є побудова залежності витрати води від швидкості розливання при різному заданому перепаді температур води на вході/виході з кристалізатора. Обумовлено це тим, що запропонована математична модель передбачає підтримку заданого значення перепаду температур Δt . Для цього візьмемо до уваги другу умову математичної моделі, завдяки якій ми можемо визначити мінімально необхідну витрату води для даного перетину.

Виходячи з рівняння (5) мінімальна витрата води буде дорівнювати

$$G_2 = 900 * 3,14 * 0,02^2 * 5 * 53,286 = 301,17 \text{ м}^3/\text{год}$$

Так як протягом року температура води, що подається, дорівнює 20-30 °С, а температура на виході з кристалізатора не повинна перевищувати 45 °С, проводити дослідження будемо для наступних перепадів температур: $\Delta t = 6$, $\Delta t = 8$, $\Delta t = 10$ та $\Delta t = 12$ °С. Розрахунки залежності витрати води від робочої швидкості розливання для різних Δt зображено на рис. 2.

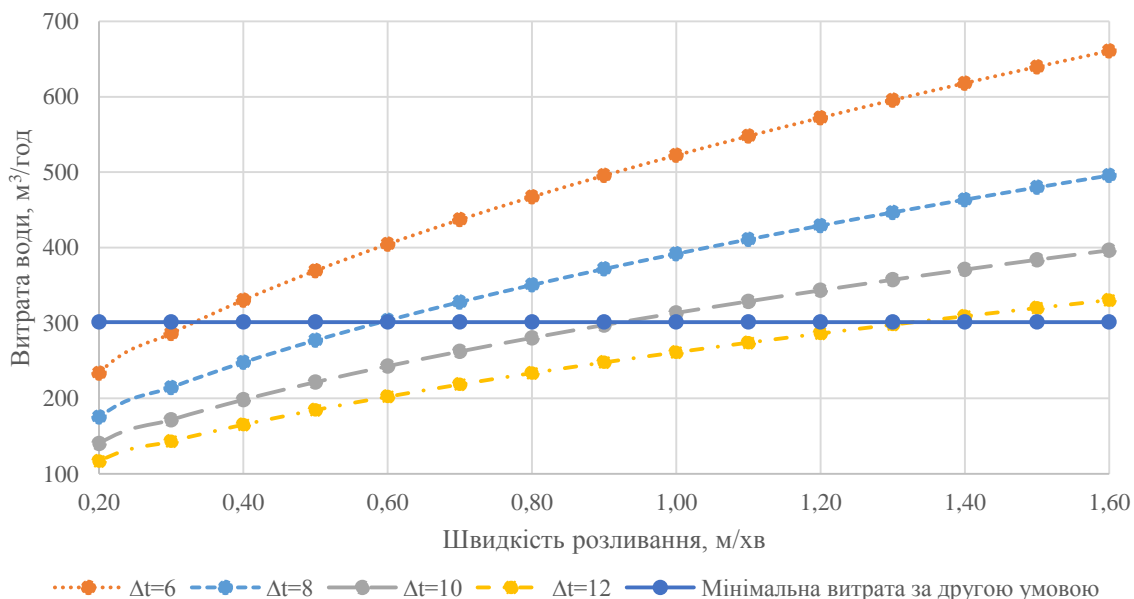


Рисунок 2 – Залежність витрати води від швидкості розливання

Спираючись на графіки (рис. 2) виключаємо значення $\Delta t=6$ і $\Delta t=12^\circ\text{C}$, так як перше завищує витрату води на низьких швидкостях розливання, а друге навпаки, менше мінімального на номінальних швидкостях розливання.

Для найбільш точного вибору побудуємо графік залежності з урахуванням практичного значення витрати води, що виставляється згідно з технологічною інструкцією та для даного перетину дорівнює $\sim 520 \text{ м}^3/\text{год}$.

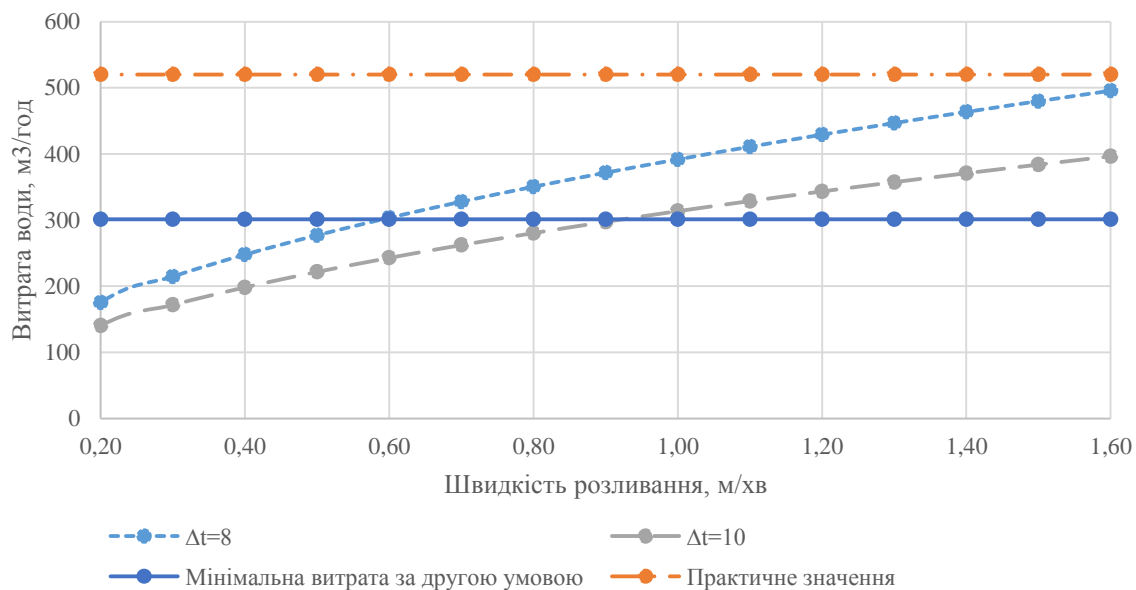


Рисунок 3 – Залежність витрати води від швидкості розливання в порівнянні зі значеннями що використовуються на виробництві

Аналізуючи графіки (рис. 3), можна припустити, що витрата в 520 м³/год була обрана як така, що забезпечує охолодження при максимальній швидкості розливання, з огляду на те що немає можливості регулювання і оперативного управління витратою.

Тепер можна зробити однозначний вибір значення $\Delta t = 8^{\circ}\text{C}$, так як діапазон витрат при даному значенні знаходиться між мінімальною та максимальною витратою що забезпечує охолодження, на робочих швидкостях розливання.

Дана математична модель може функціонувати в підпрограмі в АСУ, яка регулює витрату води на основі даних при перепаді температур, підтримання її постійного значення з корекцією за швидкістю розливання і рівню в кристалізаторі. Впровадження моделі та системи регулювання дозволить динамічно коригувати витрату води на кристалізатор, об'єднуючи функції ефективного охолодження і економії ресурсів.

З огляду на те, що номінальна робота МБРЗ становить приблизно 600 годин на місяць, з врахуванням часу на технічне обслуговування, маємо:

- витрата води в місяць без впровадження моделі

$$600 * 520 = 312\,000 \text{ м}^3$$

- витрата води при обраному значенні $\Delta t = 8^{\circ}\text{C}$, та середній швидкості розливання 1,2 м/хв складає 430 м³/год. Отже, витрата води з впровадженням моделі складає:

$$600 * 430 = 258\,000 \text{ м}^3$$

- економія води може складати $(312000 - 258000) * 12 = 648000 \text{ м}^3$ на рік.

ВИСНОВКИ

У даній роботі була досліджена математична модель при різних умовах розливання, запропонований вибір оптимального значення перепаду температур. Використання пропонованої математичної моделі дозволить на практиці ефективно і оптимально управляти охолодженням кристалізатора, а також уникнути зайвих перевитрат води.

Застосування даної моделі вимагає адаптації деяких параметрів та коефіцієнтів для кожного конкретного випадку, що є цілком доречним для більш якісного та оптимального управління, враховуючи різні умови агрегатів та вимог виробництва.

Перелік використаних джерел:

1. Повитухин, С. А. Математическое моделирование процесса охлаждения слитка в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / С. А. Повитухин // Вестник ТГТУ. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 672–681. – Режим доступа: http://vestnik.tstu.ru/rus/t_15/tom_N15.htm
2. Лукин, С. В. Совершенствование теплообмена при охлаждении металла в машинах непрерывного литья заготовок: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Лукин Сергей Владимирович. – Иваново, 2013. – 40 с.
3. Ларичев, А. В. Многофункциональное управление параметрами жидкого металла в кристаллизаторе при разливке на машине непрерывного литья заготовок / А. В. Ларичев //

Вестник череповецкого государственного университета. – 2011. – Т. 2, № 4.– С.12-15. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17104507>

4. *Васильева, А. В.* Совершенствование подходов к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ / *А. В. Васильева* // Техника и технологии машиностроения: материалы V Междунар. студ. науч.-практ. конф. (Омск, 4–10 апреля 2016 г.) / ОмГТУ. – Омск, 2016. – С. 67–72.

5. *Койфман, А. А.* Управление зоной вторичного охлаждения с учетом процесса кристаллизации непрерывно-литого слитка МНЛЗ / *А. А. Койфман, А. А. Гросс, О. О. Сушок* // Наука та виробництво : зб. наукових праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2020. – Вип. 22, спецвип. – С. 66–75. – Режим доступа: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/28059>

6. *Столяров, А. М.* Технологические расчеты по непрерывной разливке стали: учеб. пособие / *А. М. Столяров, В. Н. Селиванов*. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск, гос. тех. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. – 67 с.

7. *Кац, А. М.* Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов / *А. М. Кац, Е. Г. Шадек*. – М.: Металлургия, 1983. – 208 с.

8. *Шановалов, А. Н.* Расчет параметров непрерывной разливки стали : методические указания / *А. Н. Шановалов*. – Новотроицк : НФ НИТУ «МИСиС», 2013. – 56 с.

Зубко А. А., Койфман А. А.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ СЛИТКА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Выполнен анализ существующих моделей оценки теплового состояния кристаллизатора, диагностики тепловых процессов и охлаждения слитка. На основании изученных методов была поставлена задача предложить возможность управления охлаждением слитка в кристаллизаторе МНЛЗ в реальном времени путем расчета значения расхода воды на основании математической модели с поддержанием определенного значения перепада температур воды на входе и выходе из кристаллизатора, с учетом коррекции по уровню металла и скорости разливки.

Приводится алгоритм расчета значений расхода воды на кристаллизатор, основанный на выполнении двух условий: температура на выходе из кристаллизатора не должна превышать 45 °С; скорость движения воды в каналах стенок кристаллизатора должна быть не меньше 5 м/с. На основании предложенного алгоритма выполнен экспериментальный расчет значений расхода воды с учетом реальных производственных условий: сечения слитка, диапазона номинальных значений уровня металла и скорости разливки. Приводятся график зависимости значений расхода воды от уровня металла, при различных скоростях разливки. Построен график зависимости расхода воды от скорости разливки для различных значений перепада температур воды на входе-выходе из кристаллизатора. Произведен сравнительный анализ расчетных значений расхода воды с технологическими. Принимая во внимания два необходимых условия алгоритма расчета, а также реальные производственные значения расхода воды – выбрано оптимальное рекомендуемое значение перепада температур.

По результатам исследования можно утверждать, что данная математическая модель может функционировать в подпрограмме в АСУ, которая регулирует расход воды на

основе данных о перепаде температур, поддержания его постоянного значения с коррекцией по скорости разливки и уровню в кристаллизаторе. Использование предложенной системы позволит на практике эффективно и оптимально управлять охлаждением кристаллизатора, а также избежать лишних перерасходов воды.

Ключевые слова: МНЛЗ, кристаллизатор, математическая модель, разница температур, управление, расход воды, уровень металла, скорость разливки.

Zubko A. A., Koifman O. O.

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODEL OF HEAT EXCHANGE FOR CONTROLLING THE COOLING OF THE INGOT IN THE CONTINUOUS-CASTING MOLD

The analysis of existing models for assessing the thermal state of the mold, diagnostics of thermal processes and cooling of the ingot is carried out. Based on the studied methods, the task was set to offer the option of controlling the cooling of the ingot in the continuous-casting mold in real time by calculating the value of the water consumption on the basis of a mathematical model with the maintenance of a certain value of the water temperature drop at the inlet and outlet of the mold, taking into account the correction in the steel level and the casting rate.

An algorithm for calculating the values of water consumption per mold is given, based on two conditions: the temperature at the outlet of the mold should not exceed 45 °C; the water speed in the wall channels of the mold should not be less than 5 m/s. On the basis of the proposed algorithm, an experimental calculation of the water consumption values was carried out considering the real production conditions: the ingot section, the range of the nominal values of the steel level and the casting rate. A graph of the dependence of the values of water consumption on the steel level at different casting rates is given. A graph of the dependence of the water consumption on the casting rate for various values of the water temperature drop at the inlet-outlet from the mold is built. A comparative analysis of the calculated values of the water consumption with the technological ones is carried out. Considering the two required conditions of the calculation algorithm, as well as the actual production values of the water consumption, the optimal recommended value of the temperature drop has been selected.

Following the study, it can be argued that this mathematical model can function in a subroutine in the ACS, which regulates the water flow based on data on the temperature drop, maintaining its constant value with correction for the casting rate and the level in the mold. The use of the proposed system will allow in practice to effectively and optimally control the cooling of the mold, as well as to avoid unnecessary water waste.

Keywords: CCM, continuous-casting mold, mathematical model, steel level, water consumption, casting rate, control, temperature drop

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

Стаття надійшла 06.12.2020 р.