

*abrasive powder coincide in the direction with the movement of the piston of the pneumatic cylinder, which ensures the preservation of the piston rings or other seals of the piston.*

**Keywords:** *free abrasive finishing, grain wear, tool surface, internal grinding, soft felt circle.*

Рекомендована к публикации: доктор техн. наук, проф. В. В. Суглобов

Статья поступила 22.10.2019

УДК 669-412:004.3'124.001.57

[doi.org/10.31498/2522-9990212019187595](https://doi.org/10.31498/2522-9990212019187595)

Кананович С. І., Дордуров А. В., Кравченко В. П.

## ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ РОЗПОДІЛЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗЛИВКУ У ЗОНІ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЗАГОТІВОК

*Розглядається математична модель охолодження зливка в зоні вторинного охолодження машини безперервного розливу заготовок в стаціонарному режимі розливання, без зміни швидкості по ходу охолодження. В основу математичної моделі покладено диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності в умовах фазових перетворень (кристалізації металу) з відповідними початковими і граничними умовами. Програмна реалізація моделі потребує конкретних значень початкових і граничних умов. При цьому важливе значення мають значення коефіцієнту тепловіддачі і його розподілення по довжині зливку у зоні вторинного охолодження, а також значення швидкості розливу та витрат охолоджувачів. При вирішенні рівняння теплопровідності були прийняті граничні умови третього роду з відповідними значеннями коефіцієнтів теплопровідності і тепловіддачі.*

*В моделі були зроблені припущення, що впливають із фізичних особливостей поставленої задачі:*

- температурний режим вважаємо сталим;*
- швидкість руху зливка постійна;*
- теплообмін уздовж зливка не відбувається через малі зміни температури вздовж зливка;*
- основний теплообмін йде в площині поперечного січення зливка;*
- теплопровідність твердої і рідкої сталі вважаємо однаковою.*

*При моделюванні використовувались різні типи розподілення коефіцієнтів тепловіддачі, пропонувані раніше різними авторами. В результаті моделювання визначено розподілення, яке найбільш реально відображає процес охолодження і кристалізації зливка по всій довжині зони вторинного охолодження.*

**Ключові слова:** *машина безперервного розливу заготовок (МБРЗ), зона вторинного охолодження (ЗВО), кристалізація, затвердіння, математичне моделювання, температурне поле, коефіцієнт тепловіддачі.*

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В [1] чисельними і аналітичними методами досліджувалися процеси охолодження і затвердіння зливка в кристалізаторі і зоні вторинного охолодження (ЗВО). В цій роботі розроблено метод визначення теплової взаємозв'язку зливка з охолоджуючими пристроями в ЗВО МБРЗ, що включає вимірювання температури поверхні зливка в секціях ЗВО і математичне моделювання процесу затвердіння зливка в МБРЗ. Розроблений спосіб охолодження сляба в ЗВО МБРЗ, захищений трьома патентами на винаходи, який дозволяє витримувати раціональний температурний режим охолодження сляба при стаціонарних і перехідних режимах розливання, рекомендований до впровадження

в систему автоматизації криволінійних слябових МБРЗ для підвищення якості металу і збільшення стійкості обладнання МБРЗ.

Запропоновано алгоритм [2], який дозволяє, шляхом використання мови програмування MATLAB, представити температурний стан зливку. Методика приваблює тим, що не вимагає глибоких спеціальних знань в області програмування, але наочно представляє динаміку процесу кристалізації, для інженерного використання. При цьому вивчається температурний стан заготовки в процесі її охолодження і кристалізації. Побічно можна оцінити також форму і глибину рідкої лунки, протяжність зони двофазного стану і товщину затверділої оболонки на різних відстанях від меніска рідкого металу. У всіх цих роботах при моделюванні використовувались сталі, або експериментально підтвердженні теплофізичні коефіцієнти, що не завжди відображає реальну картину процесу охолодження.

**Постановка проблеми.** Налагодження та освоєння нових МБРЗ вимагає корекції режимів охолодження безперервного сляба в кристалізаторі та зоні вторинного охолодження, розрахованих при проектуванні установок.

Як відомо, теплообмін на поверхні заготовок визначається функцією розподілу коефіцієнтів тепловіддачі по довжині МБРЗ, яка пов'язана з інтенсивністю охолодження заготовки по периметру, обраної з умов отримання якісного металу на виході з МБРЗ.

Проблема полягає в тому, що не вірно обраний режим охолодження (витрат охолоджуючої води), швидкість розливання для різних марок сталі та їх перетину - все це може стати наслідком отримання неякісної сталі з наявністю внутрішніх тріщин, дефектів, а також ймовірності того, що на виході із зони вторинного охолодження заготовка буде з рідкою серцевиною.

**Постановка задачі.** Математично промодельовати процес кристалізації заготовок в зоні вторинного охолодження з використанням різних розподілень коефіцієнтів тепловіддачі. Це дозволить визначити, який тип розподілення найбільш достовірно відображає температурне поле безперервної заготовки в процесі її охолодження і кристалізації.

Формування початкових даних для розрахунку уточнених режимів охолодження потребує визначення функції розподілу коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні заготовки. Найчастіше ці дані отримують в результаті експериментів, як правило, пасивних, тобто одержаних в результаті спостереження параметрів розливання). Необхідно також мати дані про температуру поверхні та на гранях заготовки, швидкості розливання та витрат охолоджувача в зонах охолодження.

### **Основна частина.**

Формування початкових даних для розрахунку уточнених режимів охолодження потребує визначення функції розподілу коефіцієнтів тепловіддачі на поверхні заготовки, знання розподілення температури по поверхні і на гранях заготовки, значення швидкості розливання та витрат охолоджувача в зонах охолодження. Найчастіше ці дані отримують в результаті експериментів, як правило, пасивних, тобто одержаних в результаті контролю параметрів в процесі розливання металу. При моделюванні в даній роботі використовувались початкові дані, наведені в роботах [3].

Математичною моделлю процесу кристалізації безперервного злитка можна вважати диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності в умовах фазових перетворень (кристалізації металу) з відповідними початковими і граничними умовами.

$$\rho C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \rho q \frac{\partial \psi}{\partial \tau} \quad (1)$$

де  $\rho$  - щільність металу;

$C$  - ефективна теплоємність;

$\lambda$  - теплопровідність;

$q$  - прихована теплота плавлення;

$\psi(t)$  - функція, що враховує частку твердої фази в двофазній зоні кристалізується металу.

Рівняння доповнюється такими початковими умовами:

$$t(x, y, 0) = t_c \quad (2)$$

де  $t_c$  - температура перегрітої рідкої сталі, що надходить в кристалізатор.

В якості граничних умов при вирішенні рівняння обрані граничні умови третього роду:

$$-\lambda \frac{\partial t_{\text{пов}}}{\partial n} = \alpha(\tau)(t_{\text{пов}} - t_{\text{дов}}) \quad (3)$$

де  $t_{\text{нов}}$  - температура поверхні металу;

$t_{\text{дов}}$  - температура довкілля;

$\alpha(\tau)$  - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні металу в залежності від положення в зоні охолодження.

Зробимо наступні припущення, що впливають з фізичних особливостей завдання:

- температурний режим вважаємо сталим;
- швидкість руху зливка постійна;
- теплообмін уздовж зливка не відбувається через малі зміни температури вздовж зливка;
- основний теплообмін йде в площині поперечного перерізу зливка;
- теплопровідність твердої і рідкої сталі вважаємо однаковою.

Базуючись на припущеннях, ми можемо тривимірну задачу розглядати як двовимірну задачу теплообміну з нестационарними граничними умовами в поперечному перерізі зливка.

Для спрощення рівняння (1) було виведено ефективне значення теплоємності  $C_{\text{еф}}(t)$

$$C_{\text{еф}}(t) = \begin{cases} C_p & \text{при } t > t_l \\ \frac{C_p + C_{\text{ТВ}}}{2} - q \frac{\partial \psi}{\partial \tau} & \text{при } t_c \leq t \leq t_l \\ C_{\text{ТВ}} & \text{при } t < t_c \end{cases} \quad (4)$$

де  $t_c$  - гранична температура твердого металу (солідус);

$t_l$  - температура рідкого металу (ліквідус).

Рівняння теплопровідності набуває вигляду:

$$\rho C_{\text{еф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Відповідно до гіпотези про рівномірний виділення твердої фази в інтервалі температур ліквідус - солідус, функція  $\psi(t)$  має вигляд:

$$\psi(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t > t_l \\ \frac{t_l - t}{t_l - t_c} & \text{при } t_c \leq t \leq t_l \\ 1 & \text{при } t < t_c \end{cases} \quad (6)$$

Підставляючи вираз (6) в вираз (4) отримаємо вираз залежності теплоємності від температури:

$$C_{\text{еф}}(t) = \begin{cases} C_p & \text{при } t > t_{\text{л}} \\ \frac{C_p + C_{\text{ТВ}}}{2} - \frac{q}{t_{\text{л}} - t_{\text{с}}} & \text{при } t_{\text{с}} \leq t \leq t_{\text{л}} \\ C_{\text{ТВ}} & \text{при } t < t_{\text{с}} \end{cases} \quad (7)$$

Для чисельного рішення рівняння застосуємо сіткову апроксимацію температурного поля вздовж поперечного січення зливка. Для спрощення обчислювальних операцій виберемо однаковий крок сітки по ширині і висоті перетину зливка. Виберемо явну схему, класичну для такого роду завдань. В силу симетричності граничних і початкових умов, в якості області рішення виберемо чверть перетину зливка.

Задаємося розміром зливка  $S \times H$  і вибираємо крок дискретизації  $\Delta$  по довжині, виходячи з необхідної точності і критеріїв збіжності методу. Тоді кількість розбиття чверті перетину по ширині і по висоті відповідно буде дорівнювати (під знаком  $\lfloor \cdot \rfloor$  розуміється округлення до більшого цілого):

$$nx = \left\lfloor \frac{S}{2\Delta} \right\rfloor, ny = \left\lfloor \frac{H}{2\Delta} \right\rfloor \quad (8)$$

Розглянемо деяку елементарну комірку з температурою  $t_{i,j}$ , яка лежить в області рішення. На підставі теплового балансу тепловий потік через стінки даного осередку від сусідніх осередків йде на нагрів осередку за елементарний проміжок часу.

Представимо рівняння (1) в кінцевих різницях:

$$\rho C_{\text{еф}}(t_{i,j}) \Delta V \frac{t_{i,j}^{\text{наст}} - t_{i,j}}{\Delta \tau} = \lambda \Delta S \left( \frac{t_{i-1,j} - t_{i,j}}{\Delta x} \right) + \lambda \Delta S \left( \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\Delta x} \right) + \lambda \Delta S \left( \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta y} \right) + \lambda \Delta S \left( \frac{t_{i,j-1} - t_{i,j}}{\Delta y} \right) \quad (9)$$

де  $t_{i,j}^{\text{наст}}$  - значення температури на наступному часовому кроці;  
 $t_{i,j}$  - значення температури на даному часовому кроці;  
 $\Delta \tau$  - крок дискретизації за часом.

Індекси  $i$  та  $j$  - відповідно по ширині і висоті перетину зливка.

Беремо  $\Delta V$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  через однаковий крок  $\Delta$  і підставимо у вираз (9):

$$\rho C_{\text{еф}}(t_{i,j}) \Delta^3 \frac{t_{i,j}^{\text{наст}} - t_{i,j}}{\Delta \tau} = \lambda \Delta^2 \left( \frac{t_{i-1,j} - t_{i,j}}{\Delta} \right) + \lambda \Delta^2 \left( \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\Delta} \right) + \lambda \Delta^2 \left( \frac{t_{i,j+1} - t_{i,j}}{\Delta} \right) + \lambda \Delta^2 \left( \frac{t_{i,j-1} - t_{i,j}}{\Delta} \right) \quad (10)$$

Скоротивши (10) отримуємо:

$$t_{i,j}^{\text{наст}} = t_{i,j} + \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho C_{\text{еф}}(t_{i,j}) \Delta^2} (t_{i-1,j} + t_{i+1,j} + t_{i,j-1} + t_{i,j+1} - 4t_{i,j}) \quad (11)$$

Для граничних осередків з урахуванням граничних умов вираз для  $t_{i,j}^{\text{наст}}$  має вигляд:

- для верхньої широкої зовнішньої грані зливка

$$t_{i,j}^{\text{наст}} = t_{i,j} + \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho C_{\text{еф}}(t_{i,j}) \Delta^2} (t_{i-1,j} + t_{i+1,j} + t_{i,j-1} - 3t_{i,j} + \frac{\alpha \Delta}{\lambda} (t_{\text{довкілля}} - t_{i,j})) \quad (12)$$

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі від зливка до поверхні;

$t_{\text{довкілля}}$  – температура довкілля ЗВО.

- для нижньої широкої грані чверті зливка

$$t_{i,j}^{\text{наст}} = t_{i,j} + \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho C_{\text{еф}}(t_{i,j}) \Delta^2} (t_{i-1,j} + t_{i+1,j} + t_{i,j+1} - 3t_{i,j}) \quad (13)$$

- для бічній зовнішній межі чверті зливка

$$t_{i,j}^{\text{наст}} = t_{i,j} + \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho C_{\text{еф}}(t_{i,j}) \Delta^2} (t_{i,j+1} + t_{i-1,j} + t_{i,j-1} - 3t_{i,j} + \frac{\alpha \Delta}{\lambda} (t_{\text{довкілля}} - t_{i,j})) \quad (14)$$

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі від злитка до поверхні;

$t_{\text{довкілля}}$  - умовна температура ЗВО.

- для бічної внутрішньої грані чверті злитка

$$t_{i,j}^{\text{наст}} = t_{i,j} + \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho C_{\text{еф}}(t_{i,j}) \Delta^2} (t_{i,j+1} + t_{i,j-1} + t_{i-1,j} - 3t_{i,j}) \quad (15)$$

Найбільш істотним параметром моделі є розподіл коефіцієнта тепловіддачі по довжині ЗВО. Подібні дані є експериментальними і специфічні для конкретної МБРЗ, марок сталей, умов розливання. В якості даних вибрані результати дослідницької роботи [4], яка проводилась для визначення розподілу тепловіддачі  $\alpha$ . При моделюванні одержані графіки (рис.1) зміни температури середини зливку з використанням різних типів розподілень коефіцієнту тепловіддачі. Перший і другий графіки одержані з використанням експериментальних розподілень ( $\alpha$  № 1 та  $\alpha$  № 2).

При одержанні третього графіку використовувалось теоретичне розподілення коефіцієнту  $\alpha$ , як результат аналізу найбільш раціонального охолодження по Д. П. Євтеєву. При цьому досягається монотонне зниження температури по довжині зливка і забезпечується температура зливка в кінці зони вторинного охолодження не нижче 800-900 °С.

Розроблена в даній роботі модель дозволяє розраховувати зміну температури середини січення безперервного зливку по його довжині і підібрати таке розподілення коефіцієнтів тепловіддачі, яке найбільш відповідає реальному процесу охолодження зливку у ЗВО при стаціонарній швидкості розливу сталі по всій довжині МБРЗ.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

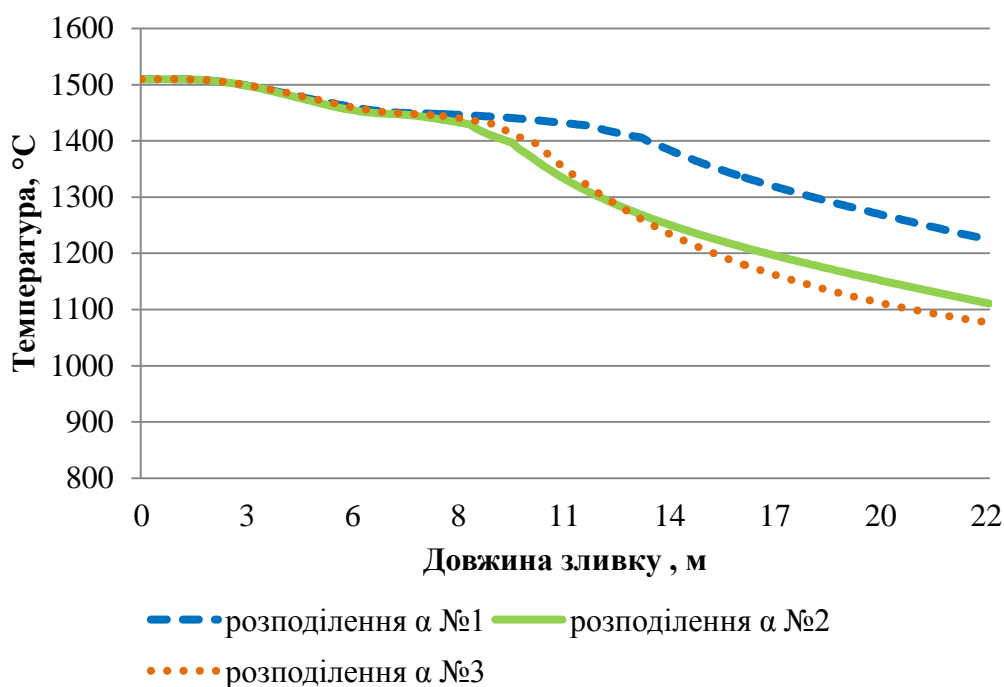


Рисунок 1 – Графік розподілу температури середини зливку з використанням різних розподілень коефіцієнтів тепловіддачі при швидкості 0,8 м/хв.

## ВИСНОВКИ

1. Використання розподілення коефіцієнтів тепловіддачі № 1 і № 2 при моделюванні показують, що в кінці зони вторинного охолодження зливки все ще має рідку серцевину.
2. Результати математичного моделювання з використанням розподілення коефіцієнта тепловіддачі № 3 найкраще відображають процес охолодження і кристалізації зливку на виході з ЗВО.
3. Пропонована модель може бути використана для прогнозу температурного поля по довжині заготовки та пошуку раціонального розподілення коефіцієнту тепловіддачі по довжині ЗВО.

### Список використаних джерел:

1. Лукин, С. В. Методические основы охлаждения металла в машинах непрерывного литья заготовок. дис. ... д-ра техн. наук 05.14.04 / Лукин Сергей Владимирович. – Череповец, 2009. – 378 с.
2. Большина, Е. П. Оптимизационная модель процесса разлива стали на МНЛЗ / Е. П. Большина, В. И. Барбаев. – Режим доступа: <https://www.sworld.com.ua/konfer24/412.htm>
3. Металлургия стали: учебник для вузов по специальности «Металлургия черных металлов» / В. И. Явойский, С. Л. Левин, В. И. Баптизмандский, М. Я. Меджибожский; ред. В. И. Явойский, Г. Н. Ойкс. – М.: Металлургия, 1973. – 816 с.
4. Якушев, А. М. Справочник конверторщика / А. М. Якушев. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 448 с.



Кананович С. И., Дордуров А. В., Кравченко В. П.

# **ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СЛИТКА В ЗОНЕ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАГОТОВОК**

*Рассматривается математическая модель охлаждения слитка в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного разлива заготовок в стационарном режиме разлива, без изменения скорости по ходу охлаждения. В основу математической модели положены дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в условиях фазовых превращений (кристаллизации металла) с соответствующими начальными и граничными условиями. При этом важное значение имеют коэффициента теплоотдачи и его распределения по длине слитка в зоне вторичного охлаждения, а также значение скорости разлива и расходов охладителей. При решении уравнения теплопроводности были приняты граничные условия третьего рода с соответствующими значениями коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи.*

*В модели были сделаны предположения, вытекающие из физических особенностей поставленной задачи:*

- температурный режим считаем постоянным;
- скорость движения слитка постоянная;
- теплообмен вдоль слитка не происходит из малого изменения температуры вдоль слитка;
- основной теплообмен идет в плоскости поперечного сечения слитка;
- теплопроводность твердой и жидкой стали считаем одинаковой.

*При моделировании использовались различные типы распределения коэффициентов теплоотдачи, предлагаемые ранее различными авторами. В результате моделирования определены распределения, которое наиболее реально отражает процесс охлаждения и кристаллизации слитка по всей длине зоны вторичного охлаждения.*

**Ключевые слова:** *Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), зона вторичного охлаждения (ЗВО), кристаллизация, затвердевание, математическое моделирование, температурное поле, коэффициент теплоотдачи.*

Kananovich S. I., Dordurov A. V., Kravchenko V. P.

# **EVALUATION OF THE USE OF DIFFERENT TYPES OF DISTRIBUTION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT IN MODELING THE COOLING PROCESS OF THE INGOT IN THE SECONDARY COOLING ZONE OF THE WORKPIECES**

*A mathematical model of the cooling of an ingot in the secondary cooling zone of a machine for continuous casting of billets in a stationary casting mode is considered, without changing the speed during cooling. The mathematical model is based on the differential equation of unsteady heat conduction in the conditions of phase transformations (metal crystallization) with the corresponding initial and boundary conditions. At the same time, the heat transfer coefficient and its distribution along the length of the ingot in the secondary cooling zone are of great importance, as well as the value of the bottling rate and the costs of the coolers. In solving the heat equation, boundary conditions of the third kind were adopted with the corresponding values of the coefficients of heat conductivity and heat transfer.*

*The model made assumptions arising from the physical features of the task:*

- the temperature regime is considered constant;
- the speed of the ingot is constant;

- *heat transfer along the ingot does not occur from a small change in temperature along ingot;*
- *the main heat transfer is in the plane of the cross section of the ingot;*
- *the thermal conductivity of solid and liquid steel is considered the same.*

*In the simulation, various types of distribution of heat transfer coefficients, previously proposed by various authors, were used. As a result of the simulation, the distributions are determined that most realistically reflects the cooling and crystallization of the ingot along the entire length of the secondary cooling zone.*

**Keywords:** *Continuous casting machine (CCM), secondary cooling zone (SCZ), crystallization, solidification, mathematical modeling, temperature field, heat transfer coefficient.*

Рекомендовано до публікації: канд. техн. наук, доц. О. І. Сімкін

Стаття надійшла 07.11.2019