

УДК 004.94:621.746.62

DOI:

Люта А. В., Макшанцев В. Г., Афанасьєва М. А.

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОГО СЛЯБА

Розвиток сучасної техніки пред'являє все більш високі вимоги до якості і властивостей металевих виробів. У металургійній практиці кристалізація є одним з основних і відповідальних етапів в технологічному ланцюгу отримання виробів зі сталей та сплавів.

Проблема якості безперервнолитих заготовок є центральною в процесі безперервного розливання і їй підпорядкований весь процес створення машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Вирішити поставлену проблему якості вихідного злитка, крім якісних показників сталі і вибору оптимальних технологічних параметрів розливання дозволяє застосування системи м'якого обтиску злитка.

Дана система використовує математичну модель кристалізації злитка, засновану на вирішенні нелінійного диференційного рівняння нестационарної теплопровідності, яка дозволяє розрахувати раціональне місце для вкладання зусилля м'якого обтиску. Застосування даної системи дозволяє збільшити якість вихідної заготовки за рахунок зменшення осьової ліквідації і поліпшення внутрішньої макроструктури злитка, а також збільшити швидкість розливання заготовок, що призводить до збільшення продуктивності всієї МБЛЗ.

Процес утворення скоринки злитка в кристалізаторі безпосередньо впливає на якість поверхні відливної заготовки і продуктивність МБЛЗ. Дефекти скоринки заготовки неможливо виправити подальшими умовами охолодження. На виході з кристалізатора скоринка злитка повинна бути рівномірної товщини і утримувати феростатичний тиск рідкої сталі, щоб запобігти прориви металу. Для цього потрібна організація інтенсивного і безперервного відводу тепла від рідкої сталі до охолоджувальної води в кристалізаторі [1, 2].

Метою роботи є створення математичної моделі кристалізації безперервнолитого сляба.

Раніше тема з регулюванням подачі води вже була розглянута, але не враховано головне: злиток - це не один перетин, а сума всіх перетинів. У наукових роботах минулих років були зроблені певні висновки про доцільність регулювання подачі охолоджуючої рідини в кристалізаторі і ЗВО. Двомірний модель не враховує параметри кристалізації в злитку по вертикальній осі Z, тобто в масштабі часу, з цього випливає висновок, що вода витрачається нерационально. Розроблена в [3] тривимірний модель допомагає більш детально заглибитися в дану тему і подивитися на розподіл температур не в одному (окремому) перетині, а по всьому зливку.

Система м'якого обтиску включає засоби для здійснення самого м'якого обтиску: гідрофіковані роликові сегменти і засоби АСУ ТП для реалізації управління технологічним процесом м'якого обтиску. Розробка керуючих алгоритмів верхнього і базового рівнів управління, а також налаштувань позиціонування здійснюється з використанням математичної моделі м'якого обтиску. Для управління секціями, що дозволяють здійснити м'яке обтиснення необхідно контролювати температурний профіль заготовки, що може бути визначено шляхом вирішення теплової задачі, що дозволяє визначити глибину залягання рідкої фази в межах металургійної довжини машини і процентне співвідношення твердої фази до загальної ширини сляба в різних перетинах.

Для опису процесу затвердіння за основу приймається диференціальне рівняння енергії з внутрішніми джерелами тепла, особливістю якого для зони кристалізації є облік теплоти, що виділяється в кристалізації.

Рівняння енергії при наявності внутрішніх джерел тепла в загальному вигляді:

$$\rho \cdot \frac{dT}{d\tau} = \operatorname{div} \lambda \cdot \operatorname{grad} t + q_v, \quad (1)$$

де  $\frac{dT}{d\tau}$  - повна (субстанціональна) похідна ентальпії за часом;

$q_v$  - щільність внутрішніх джерел тепла;

$\rho$  - щільність металу, кг / м<sup>3</sup>;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності металу, Вт / мК;

$C$  - поточна температура в перетині злитка, t°.

За умови нерухомості середовища і при постійних фізичних властивостях:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div} \lambda \cdot \operatorname{grad} t + q_v, \quad (2)$$

де  $C$  - питома теплоємність металу, Дж / КГК.

У розгорнутій формі рівняння (2) запишеться у вигляді:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + q_v. \quad (3)$$

Рівняння (3) є нестационарним, тривимірним (функція  $T$  залежить від трьох просторових змінних  $x, y, z$ ), а також рівнянням параболічного типу. Дане рівняння неоднорідне, тому що теплоємність, теплопровідність і щільність, різні за значенням в різних точках речовини, і нелінійне, оскільки перераховані вище величини залежать від температури  $T$  (тобто від шуканого рішення).

При додатковому припущенні про характер процесу теплопередачі, рівняння (3) можна спростити, враховуючи те, що ми маємо справу з затвердінням широких слябів з співвідношенням сторін більше 1: 4 (основний розмір розливається сляба 250x1800 мм), тоді процес кристалізації можна з достатньою точністю уявити одновимірної завданням нестационарної теплопровідності [4].

Якщо велика теплопередача відбувається від широкої грані в напрямку осі  $x$ , то

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q_v. \quad (4)$$

Так як теплота кристалізації виділяється в інтервалі ( $T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}$ ), значення щільності внутрішніх джерел тепла —  $q_v$  запишеться у вигляді:

$$q_v = q_{\text{кр}} \cdot \rho \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \tau}, \quad (5)$$

де  $q_{\text{кр}}$  - прихована теплота кристалізації, Дж / кг;

$\rho$  - щільність металу, кг / м<sup>3</sup>;

$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau}$  - швидкість затвердіння розплаву, м / с.

З огляду на перетворення значення щільності внутрішніх джерел тепла —  $q_v$ :

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + q_{\text{кр}} \cdot \rho \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \tau}, \quad (6)$$

де  $\Psi = \frac{V_{\text{ТВ}}}{V_0}$  - об'ємна частка твердої фази в контрольному елементі двофазної зони.

Параметр  $\Psi$  в загальному випадку визначається кінетикою зростання кристалів у фро-

нту кристалізації злитка. Однак для досить масивних сталевих злитків переохолодження розплаву у фронті кристалізації невелике і частка твердої фази повністю визначається рівноважною діаграмою стану досліджуваного сплаву [5].

Для бінарної діаграми стану сплаву частка твердої фази визначено правилом важеля:

$$\Psi = \frac{C_{\text{ж}} - C}{C_{\text{ж}} - C_{\text{ТВ}}} = \Psi \cdot t, \quad (7)$$

де  $C_{\text{ж}}$  - концентрація рідкого компонента сплаву;

$C_{\text{ТВ}}$  - концентрація твердого компонента.

Ці параметри залежать від локальної температури  $T$  в умовах квазірівноваги:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} = \frac{\partial \Psi}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (8)$$

Підставимо це в рівняння нестационарної теплопровідності. В результаті отримаємо

$$\rho \cdot C - q_{\text{кр}} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (9)$$

Для спрощення методики рішення задачі затвердіння теплоту кристалізації будемо враховувати за допомогою введення величини ефективної теплоємності  $C_{\text{эф}}$  сплаву. Тоді:

$$\rho \cdot C_{\text{эф}} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (10)$$

Величина ефективної теплоємності  $C_{\text{эф}}$  задається у вигляді системи доповненої значенням величини теплоємності в твердому стані:

$$C_{\text{эф}} \cdot t = \begin{cases} C_{\text{ж}}, & \text{при } t > t_{\text{Л}}; \\ C(t) - q_{\text{кр}} \frac{\partial \psi}{\partial t}, & \text{при } t_c \leq t \leq t_{\text{Л}}; \\ C_{\text{ТВ}}, & \text{при } t < t_c. \end{cases} \quad (11)$$

Таким чином, облік виділення теплоту кристалізації в двофазній зоні зводиться до відповідного завданням залежності  $C_{\text{эф}} = C_{\text{эф}}(t)$ .

Якщо прийняти, що лінії ліквідусу і солідусу - паралельні прямі, то відносна кількість твердої фази  $\Psi$  може бути знайдено з співвідношення:

$$\Psi = \frac{t_{\text{Л}} - t}{t_{\text{Л}} - t_c}. \quad (12)$$

Так як дифузійні процеси в двофазній зоні відбуваються з достатньою повнотою і при постійному темпі кристалізації сплаву всередині інтервалу температур  $T_{\text{Л}} - t_c$ , величину  $\frac{\partial \Psi}{\partial \tau}$  швидкості затвердіння розплаву можна визначити за схемою виділення тепла Ю.А. Самойловича (13), так як це рекомендовано авторами [6], так як дана схема є простою і дає близькі результати (похибка менше 2%), отримані за досить громіздкими схемами виділення тепла (приклад схема В.Т. Борисова), що значно скоротить машинний час при роботі моделі:

$$-\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} = \frac{1}{t_{\text{Л}} - t_c}. \quad (13)$$

Тоді ефективна теплоємність буде дорівнює:

$$C_{\text{эф}} t = \begin{cases} C_{\text{ж}}, & \text{при } t > t_{\text{Л}}; \\ C t + q_{\text{кр}} \cdot \frac{1}{t_{\text{Л}} - t_{\text{С}}}, & \text{при } t_{\text{С}} \leq t \leq t_{\text{Л}}; \\ C_{\text{ТВ}}, & \text{при } t < t_{\text{С}}. \end{cases} \quad (14)$$

Величину ефективної теплоємності  $C t$  в інтервалі температур ликвідус - солидус, температура твёрдожідкої (двофазної) зони, найбільш точно і з урахуванням часток твердої і рідкої фаз можна визначити дотримуючись рекомендацій [5]:

$$C t = C_{\text{ТВ}} \cdot \Psi + C_{\text{ж}} \cdot (1 - \Psi). \quad (15)$$

Остаточно система ефективної теплоємності для різних діапазонів температур:

$$C_{\text{эф}} t = \begin{cases} C_{\text{ж}}, & \text{при } t > t_{\text{Л}}; \\ C_{\text{ТВ}} \cdot \Psi + C_{\text{ж}} \cdot (1 - \Psi) + q_{\text{кр}} \cdot \frac{1}{t_{\text{Л}} - t_{\text{С}}}, & \text{при } t_{\text{С}} \leq t \leq t_{\text{Л}}; \\ C_{\text{ТВ}}, & \text{при } t < t_{\text{С}}. \end{cases} \quad (16)$$

Істотний вплив на хід процесів кристалізації надає гідродинаміка розплаву, проте безпосереднє вимірювання швидкостей конвективних потоків в рідкому ядрі злитка представляє значні труднощі. Авторами [5, 6] пропонується непрямий спосіб обліку явищ гідродинамічного перемішування розплаву в ядрі. Для обліку явищ конвективного теплопереносу в рідкій і твердій фазах вводять поняття ефективного коефіцієнта теплопровідності ( $\lambda_{\text{эф}}$ ), значення якого приймають в кілька разів більше коефіцієнта теплопровідності в рідкій і твёрдожідкої фазах.

Залежність коефіцієнта ефективної теплопровідності від температури з урахуванням співвідношення рідкої і твердої фаз, з урахуванням конвективних потоків, що характеризують явища гідродинамічного перемішування розплаву в ядрі можна записати:

$$\lambda t = \begin{cases} \lambda_{\text{ж}} \cdot \varepsilon, & \text{при } t > t_{\text{Л}}; \\ \lambda_{\text{ж}} (1 - \psi) \cdot \varepsilon - 1 + \lambda_{\text{ТВ}} \psi, & \text{при } t_{\text{С}} \leq t \leq t_{\text{Л}}; \\ \lambda_{\text{ТВ}}, & \text{при } t < t_{\text{С}}, \end{cases} \quad (17)$$

де  $\varepsilon = 2 \div 5$ ,  $\varepsilon = 1.1 \div 1.5$  - коефіцієнт збільшення теплопровідності рідкої фази і двофазної зони за рахунок конвективних потоків, відповідно.

Залежність коефіцієнта ефективної щільності запишемо за аналогією з системою для ефективної теплопровідності (17) з урахуванням співвідношення рідкої і твердої фаз:

$$\rho_{\text{эф}} t = \begin{cases} \rho_{\text{ж}}, & \text{при } t > t_{\text{Л}}; \\ \rho_{\text{ж}} (1 - \psi) + \rho_{\text{ТВ}} \psi, & \text{при } t_{\text{С}} \leq t \leq t_{\text{Л}}; \\ \rho_{\text{ТВ}}, & \text{при } t < t_{\text{С}}. \end{cases} \quad (18)$$

В аналогічних моделях значення щільності приймалося як постійна величина, що є невірним так як сталь при кристалізації збільшує свою щільність. Так як значення щільності змінюється, то перетин злитка на виході буде менше ніж перетин на меніску, дане явище називається усадкою. На всіх існуючих МБЛЗ усадка компенсувалася налаштуванням все роликів секцій на конус, навіть сам кристалізатор робиться з невеликою конусністю. Так як налаштування даного конуса занадто відповідальне, що супроводжується переустановленням всіх роликів секцій, то воно проводиться тільки один раз для даного сорту розливаемої ста-

лі. Так як щільність є величиною, яка характеризує усадку, рівняння нестационарної теплопровідності (10) є нелінійним внаслідок залежності теплоємності. Труднощі вирішення даного нелінійного рівняння долаються за рахунок використання чисельного методу його рішення.

Початкові умови характеризують розподіл температур в початковий момент часу, тобто на верхній межі заготовки (меніску), що припускає постійне значення температури на протязі всього періоду розливання:

$$T|_{\tau=0} = T_0 = const, \quad (19)$$

де  $T_0$  - початкове значення температури металу.

Дана умова справедлива в разі відсутності теплових втрат з поверхні меніска, що можливо при забезпеченні гарної теплоізоляції.

При вирішенні диференціальних рівнянь можуть задаватися граничні умови 1, 2 або 3 роду. Для вирішення даного рівняння найбільш ефективним буде використання для опису теплообміну граничних умов третього роду.

У загальному вигляді граничні умови 3 роду можна записати використовуючи зв'язок температури поверхні заготовки з щільністю теплового потоку по закону Фур'є:

$$-\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = q = \alpha \cdot (t_{нов} - t_{сп}), \quad (20)$$

де  $q$  - значення щільності теплового потоку, Вт / м<sup>2</sup>;

$\alpha$  - коефіцієнт теплопередачі між поверхнею злитка і охолоджуючої середовищем, Вт / м<sup>2</sup>;

$t_{нов}$  - температура поверхні злитка, °С;

$t_{сп}$  - середня температура охолоджуючої середовища, °С.

Значення щільності теплового потоку  $q$  в загальному випадку визначається з урахуванням трьох основних механізмів теплопереносу - кондуктивного, конвективного і радіаційного. Але якщо врахувати, що в зоні вторинного охолодження температура сляба значно вище температури пароутворення води (> 100°С), тоді до основних трьох механізмів теплопереносу необхідно додати ще четвертий - теплообмін за рахунок випаровування води. Всі чотири механізми будуть оцінені і проранжовано за значимістю нижче.

Тоді сумарне значення щільності теплового потоку з урахуванням всіх механізмів:

$$q = q_{конд} + q_{конв} + q_{рад} + q_{исп}, \quad (21)$$

де  $q_{конд}$  - значення частки теплового потоку, що відводиться теплопровідністю (при контакті заготовки з конструктивними елементами МБЛЗ (в основному роликми), визначається за емпіричними даними);

$q_{конв}$  - значення частки теплового потоку, що відводиться при безпосередньому контакті заготовки з охолоджуючим середовищем в ЗВО або теплопередачі, при контакті з охолоджувачем через розділяє стінку в кристалізаторі;

$q_{рад}$  - значення частки теплового потоку, що відводиться за рахунок радіаційного теплообміну, коли заготовка охолоджується за рахунок випромінювальної здатності своєї поверхні;

$q_{исп}$  - значення частки теплового потоку, що відводиться випаровується водою (паром) від поверхні заготовки в зоні вторинного охолодження.

Так як значення кондуктивного теплопереносу оцінити досить важко в зв'язку з тим,

що температура роликів, які беруть участь в цьому теплообміні, не постійна і може змінюватися в ході всього процесу розливання, так само як і температура охолоджуючої її води, то значення кондуктивного теплопереносу зазвичай беруть як усереднене значення за емпіричними даними. Розрахувати теплоперенос можна відповідно до закону Фур'є:

$$q_{\text{конд}} = \lambda_{\text{рол}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{пов}} - T_{\text{рол}}, \quad (22)$$

де  $\lambda_{\text{рол}}$  - значення коефіцієнта теплопровідності роликів, Вт / м $\lambda_{\text{рол}}$ °;

$\sigma$  - радіус охладжуемого ролика, м;

$T_{\text{пов}}$  - поточна температура поверхні заготовки, °С;

$T_{\text{рол}}$  - ustalena температура охолоджуваних роликів, °С.

Знайдемо значення кондуктивного теплопереносу, враховуючи що ролики виготовлені з теплостійких легованої сталі, температура роликів в сталому режимі розливання постійна і дорівнює близько 200°С, відповідно для даної температури і марки сталі коефіцієнт теплопровідності роликів дорівнює 16 Вт / м°С, радіус підтримувальних роликів 150 мм. Розрахунки будемо проводити для температури злитка перебуває у вторинному охолодженні при температурі поверхні 1100 °С:

$$q_{\text{конд}} = 16 \cdot 0,15 \cdot 1100 - 200 = 98 \text{ кВт/м}^2. \quad (23)$$

Значення частки теплового потоку, що відводиться при безпосередньому контакті заготовки з охолоджуючим середовищем в ЗВО визначається відповідно до закону Фур'є:

$$q_{\text{конв}} = \alpha \cdot T_{\text{пов}} - T_{\text{ср}}, \quad (24)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт теплопередачі між поверхнею злитка і охолоджуючої середовищем в даному випадку це вода, Вт / м $^2$ ;

$t_{\text{пов}}$  - температура поверхні злитка, °С;

$t_{\text{ср}}$  - середня температура охолоджуючої середовища (води), °С.

Коефіцієнт теплопередачі між поверхнею злитка в даному випадку для зони вторинного охолодження, при ролико-форсуночному охолодженні коливається в діапазоні 250÷500 Вт / м $^2$  [5, 6].

Зробимо розрахунок конвективного теплопереносу при аналогічних умовах, які приймалися в розрахунку кондуктивного теплопереносу, за умови, що температура охолоджуючої води в ЗВО 40 °С:

$$q_{\text{конв}} = 300 \cdot 1100 - 40 = 318 \text{ кВт/м}^2. \quad (25)$$

Значення частки теплового потоку, що відводиться за рахунок радіаційного теплообміну можна визначити за законом випромінювання Стефана-Больцмана [5]:

$$q_{\text{рад}} = C \cdot \frac{T_{\text{пов}}^4}{100} - \frac{T_{\text{ср}}^4}{100}, \quad (26)$$

де  $C = \epsilon \cdot C_0$  - приведений коефіцієнт випромінювання, Вт / м $^2$ К $^4$ ;

$\epsilon = 0,7 \div 0,8$  - коефіцієнт чорноти поверхні злитка;

$C_0 = 5,67$  - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м $^2$ К $^4$ .

Зробимо розрахунок теплопереносу випромінюванням при аналогічних умовах, які приймалися в розрахунках попередніх теплопереносів, за умови, що температура середовища в ЗВО близько 100°З:

$$q_{\text{рад}} = 5.67 \cdot 0.75 \cdot \frac{1100+273}{100}^4 - \frac{100+273}{100}^4 = 140 \text{ кВт/м}^2. \quad (27)$$

Природно припустити, що при охолодженні злитка водою в зоні вторинного охолодження при попаданні води на розпечену поверхню злитка відбувається її часткове випаровування, що призводить до суттєвої теплопередачі від поверхні злитка в силу його великої теплоти пароутворення.

В ході досліджень на спеціальному стенді [5] встановлено, що при струменевому охолодженні поверхні заготовки (температуру якої підтримували рівній тисячі триста двадцять три К) відносна кількість води, що випаровується склало 8-10% при зміні об'ємної щільності зрошення від 2 до 7 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с.

Значення частки теплового потоку, відповідного теплоті, що витрачається на випаровування охолоджувальної води [5]:

$$q_{\text{исп}} = x_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot p_{\text{в}}, \quad (28)$$

де  $x_{\text{в}}$  - частка води, яка перетворилася на пару;

$\eta_{\text{в}}$  - питома теплота пароутворення води,  $\eta_{\text{в}} = 2260 \cdot 10^3$  Дж / кг;

$\rho_{\text{в}}$  - щільність води,  $\rho_{\text{в}} = 1000$  кг / м<sup>3</sup>;

$p_{\text{в}}$  - об'ємна щільність зрошення, м<sup>3</sup> / (м<sup>2</sup>·ч).

Зробимо розрахунок теплопереносу випаровується водою при аналогічних умовах, які приймалися в розрахунках попередніх теплопереносів, за умови, що частка води, яка перетворилася на пару становить 0.1 і об'ємна щільність зрошення для розглянутого ділянки ЗВО 3 м<sup>3</sup> / (м<sup>2</sup>·ч), тоді за формулою (28) тепловий потік буде дорівнює:

$$q_{\text{исп}} = 0.1 \cdot 2260 \cdot 10^3 \cdot 1000 \cdot 3 = 3600 = 188 \text{ кВт/м}^2. \quad (29)$$

Зведемо все розраховані величини теплових потоків, що відповідають за різні механізми теплопереносу в таблицю 1 для їх порівняння.

Виходячи з даних таблиці 1 можна зробити висновок, що теплоперенос випаровування займає не менш важливе місце в сумарному теплопереносі, і навіть є великим за значенням, при аналогічних розрахунках, ніж кондуктивний теплоперенос і теплоперенос радіацією. Тому вплив теплопереносу випаровуванням має бути враховано при побудові моделі кристалізації злитка.

Таблиця 1

Величини теплових потоків і їх значущість

	Тепловий потік, кВт / м <sup>2</sup>	Значимість, %
кондуктивний теплоперенос	98	13.2
конвективний теплоперенос	318	42.7
теплоперенос радіацією	140	18.8
теплоперенос випаровуванням	188	25.3
сумарний теплоперенос	744	100

Отже, вищенаведена система рівнянь (10, 16-18), разом з умовами однозначності є повне формулювання математичної моделі процесу кристалізації безперервного злитка.

## ВИСНОВКИ

Чисельне рішення даної системи дозволить визначити температурне поле безперервного злитка в будь-який момент часу від початку формування оболонки злитка на рівні металу в кристалізаторі і необхідні параметри двофазної зони необхідні для системи управління м'яким обтисненням, а також вплив зовнішніх умов на тепловий режим формування безперервного злитка.

Даний метод математичного моделювання дозволяє з достатньою точністю отримати параметри зони м'якого обтиску такі як: стан і довжина зони м'якого обтиску, необхідне для визначення задіяних секцій (включена, вимкнена, включена половина секції); максимальну усадку сталі в зоні м'якого обтиснення, що дозволяє визначити величину ходу штоків гідроциліндрів на роликів секції м'якого обтиску.

Дана математична модель може бути також використаня для моделювання процесів охолодження злитка, що дає можливість управління режимами охолодження; прогнозування товщини кірки на виході з кристалізатора, щоб попередити можливість проривів кірки; розрахунок довжини повністю закристалізованого злитка, для підбору оптимальних режимів розкрою злитка (розрізання на мірні довжини). За допомогою даної моделі можна оптимізувати процес розливання сталі на мінімальні економічні витрати і підвищення продуктивності всієї МБЛЗ, що в свою чергу призведе до поліпшення економічного ефекту, тобто отримання максимального прибутку при мінімальних витратах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Евтеева Д.П., Самойлович Ю. А. Теплотехнические основы технологии конструирования машин непрерывного литья заготовок : Учеб. помощь. Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-т, 2010. 135 с.
2. Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок : учебн. пособие для вузов. М. : Металлургия, 2011. 149 с.
3. Люта А. В., Афанасьєва М. А., Макшанцев В. Г. Розробка тривимірної моделі процесу затвердіння сталі в кристалізаторі. *Вісник ДДМА*. 2019. № 1(45). С. 132-136. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/Herald\\_1\(45\)\\_2019/article/23.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_1(45)_2019/article/23.pdf)
4. Емельянов В. А. Теплова работа машин безперервного лиття заготовок : Навчальний посібник для ВНЗ. М. : Металлургия, 1988. 143 с.
5. Малевич Ю.А., Самойлович Ю. А. Теплофизические основы затвердения слитков. Минск : Высш. шк., 1989. 202 с.
6. Буланов Л. В. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет. Под общей редакцией Г.А. Шалаева. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003. 320 с.

## REFERENCES

1. Evteeva D.P., Samoilovich Yu. A. Thermotechnical bases of technology of designing of machines of continuous casting of preparations : Textbook help. Krasnoyarsk : Krasnoyarsk Publishing House. University, 2010. 135 p. (in Russian).
2. Emelyanov V.A. Thermal work of machines of continuous casting of preparations : textbook manual for universities. M. : Metallurgy, 2011. 149 p. (in Russian).
3. Liuta A.V., Afanasieva M.A., Makshantsev V.G. Development of a three-dimensional model of the curing process of steel in the mold. *Herald of the DSEA*. 2019. № 1 (45). Pp. 132-136. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/Herald\\_1\(45\)\\_2019/article/23.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_1(45)_2019/article/23.pdf) (in Ukrainian).
4. Emelyanov V.A. Thermal operation of machines for continuous casting of blanks: A textbook for universities. M. : Metallurgy, 1988. 143 p. (in Ukrainian).
5. Malevich Yu.A., Samoilovich Yu. A. Thermophysical bases of ingot hardening. Minsk: Higher. shk., 1989. 202 p. (in Russian).
6. Bulanov L.V. Machines for continuous casting of workpieces. Theory and calculation. Shalayeva G.A. eds. Ekaterinburg: Ural Center for Advertising and Advertising, 2003. 320 p. (in Russian).

## АВТОРИ / АВТОРЫ / AUTORS

Люта А. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри АВП;

Лютая А. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры АПП;

Liuta A. V. – Candidate of Technical Science, Associate Professor.

E-mail: [asyalyutaya@gmail.com](mailto:asyalyutaya@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-9606-875X>



Макшанцев В. Г. – канд. техн. наук, доцент кафедри АВП;  
Макшанцев В. Г. – канд. техн. наук, доцент кафедри АПП;  
Makshantsev V. G. – Candidate of Technical Science, Associate Professor.  
E-mail: [kram\\_don@ukr.net](mailto:kram_don@ukr.net)

Афанасьєва М. А. – канд. техн. наук, доцент кафедри АВП;  
Афанасьєва М. А. - канд. техн. наук, доцент кафедри АПП;  
Afanasyeva M. A. – Candidate of Technical Science, Associate Professor.  
E-mail: [marharyta.afanasyeva@gmail.com](mailto:marharyta.afanasyeva@gmail.com); <https://orcid.org/0000-0002-6981-282X>

Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА), м. Краматорськ.  
Донбасская государственная машиностроительная академия (ДГМА), г. Краматорск.  
Donbass State Engineering Academy (DSEA), Kramatorsk.

#### АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ANNOTATION

**Люта А. В., Макшанцев В. Г., Афанасьєва М. А. Розробка математичної моделі кристалізації безперервнолитного сляба. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2020. № 1 (48).**

Процес створення машин безперервного лиття заготовок та вирішення проблеми якості безперервнолитих заготовок вирішується в роботі з використанням системи м'якого обтиску злитка. Дана система використовує математичну модель кристалізації злитка, засновану на вирішенні нелінійного диференційного рівняння нестационарної теплопровідності, яка дозволяє розрахувати раціональне місце для вкладання зусилля м'якого обтиску. Застосування даної системи дозволяє збільшити якість вихідної заготовки за рахунок зменшення осьової ліквации і поліпшення внутрішньої макроструктури злитка, а також збільшити швидкість розливання заготовок, що призводить до збільшення продуктивності всієї МБЛЗ. В роботі розроблено математичну модель кристалізації безперервнолитного сляба. Для опису процесу затвердіння за основу приймається диференціальне рівняння енергії з внутрішніми джерелами тепла, особливістю якого для зони кристалізації є облік теплоти, що виділяється в кристалізації. Чисельне рішення отриманої системи дозволить визначити температурне поле безперервного злитка в будь-який момент часу від початку формування оболонки злитка на рівні металу в кристалізаторі і необхідні параметри двофазної зони, необхідні для системи управління м'яким обтисненням, а також вплив зовнішніх умов на тепловий режим формування безперервного злитка. Даний метод математичного моделювання дозволяє з достатньою точністю отримати параметри зони м'якого обтиску такі як: стан і довжина зони м'якого обтиску, необхідні для визначення задіяних секцій (включена, вимкнена, включена половина секції); максимальну усадку стали в зоні м'якого обтиснення, що дозволяє визначити величину ходу штоків гідроциліндрів на роликів секції м'якого обтиску. Дана математична модель може бути також використана для моделювання процесів охолодження злитка, що дає можливість управління режимами охолодження; прогнозування товщини кірки на виході з кристалізатора, щоб попередити можливість проривів кірки; розрахунок довжини повністю закристалізованого злитка для підбору оптимальних режимів розкрою злитка (розрізання на мірні довжини). За допомогою даної моделі можна оптимізувати процес розливання сталі на мінімальні економічні витрати і підвищення продуктивності всієї МБЛЗ, що в свою чергу призведе до поліпшення економічного ефекту, тобто отримання максимального прибутку при мінімальних витратах.

**Ключові слова:** машина безперервного лиття заготовок, злиток, кристалізатор.

**Лютая А. В., Макшанцев В. Г., Афанасьєва М. А. Разработка математической модели кристаллизации непрерывнолитого сляба. Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. 2020. № 1 (48).**

Процесс создания машин непрерывного литья заготовок и решения проблемы качества безперервнолитых заготовок решается в работе с использованием системы мягкого обжима слитка. Данная система использует математическую модель кристаллизации слитка, основанную на решении нелинейного дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, которая позволяет рассчитать рациональное место приложения усилия мягкого обжима. Применение данной системы позволяет увеличить качество исходной заготовки за счет уменьшения осевой ликвации и улучшения внутренней макроструктуры слитка, а также увеличить скорость разливания заготовок, что приводит к увеличению производительности всей МБЛЗ. В работе разработана математическая модель кристаллизации безперервнолитного сляба. Для описания процесса затвердевания за основу принимается дифференциальное уравнение энергии с внутренними источниками тепла, особенностью которого для зоны кристаллизации является учет теплоты, выделяющейся в кристаллизации. Численное решение полученной системы позволит определить температурное поле безперервнолитого слитка в любой момент времени от нача-

ла формирования оболочки слитка на уровне металла в кристаллизаторе и необходимые параметры двухфазной зоны, необходимые для системы менеджмента мягким обжатием, а также влияние внешних условий на тепловой режим формирования непрерывного слитка. Данный метод математического моделирования позволяет с достаточной точностью получить параметры зоны мягкого обжима такие как: состояние и длина зоны мягкого обжима, необходимые для определения задействованных секций (включена, выключена, включена половина секции) максимальную усадку стали в зоне мягкого обжатия, что позволяет определить величину хода штоков гидроцилиндров на роликосекции мягкого обжима. Данная математическая модель может быть также использована для моделирования процессов охлаждения слитка дает возможность управления режимами охлаждения; прогнозирования толщины корки на выходе из кристаллизатора, чтобы предупредить возможность прорывов корки; расчет длины полностью закристаллизованного слитка для подбора оптимальных режимов раскроя слитка (разрезания на мерные длины). С помощью данной модели можно оптимизировать процесс разлива стали на минимальные экономические расходы и повышение производительности всей МНЛЗ, что в свою очередь приведет к улучшению экономического эффекта, то есть получение максимальной прибыли при минимальных затратах.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, слиток, кристаллизатор.

**Luta A. V., Makshanzev V. G., Afanasieva M. A. The development of mathematical model of crystallization of continuous cast slab. *Herald of the DSEA*. 2020. № 1 (48).**

The process of creating machines for continuous casting of blanks and solving the problem of quality of continuous cast blanks is solved in the work by using a system of soft compression of the ingot. This system uses a mathematical model of ingot crystallization based on the solution of a nonlinear differential equation of non-stationary thermal conductivity, which allows to calculate a rational place for the insertion of the force of soft compression. The application of this system allows to increase the quality of the ingot by reducing the axial elution and improving the internal macrostructure of the ingot, and increase the speed of casting of the workpieces, which leads to an increase in the productivity of the entire caster. The mathematical model of crystallization of a continuous cast slab is developed. To describe the curing process, the differential equation of energy with internal heat sources is taken as a basis. The numerical solution of the obtained system will determine the temperature field of continuous ingot at any time from the beginning of the formation of the ingot shell at the metal level in the mold and the necessary parameters of the two-phase zone required for the soft compression control system, and the influence of external conditions on the thermal mode of molding continuous ingot. This method of mathematical modeling allows to obtain with sufficient accuracy the parameters of the soft compression zone, such as: the state and length of the soft compression zone required to determine the involved sections (included, off, included half of the section); maximum shrinkage of steel in the area of soft compression, which allows you to determine the amount of stroke of the cylinders of cylinders on the roller section of soft compression. This mathematical model can be used to simulate the ingot cooling processes, it enables the control of cooling modes; predicting the thickness of the crust at the outlet of the mold, to prevent the possibility of breakouts of the crust; calculation of length of fully crystallized ingot for selection of optimal modes of cutting ingot (cutting into measured lengths). With this model it is possible to optimize the process of casting steel at the lowest economic cost and increase the productivity of the entire caster, it will lead to an improvement in the economic effect, that is, to obtain the maximum

**Keywords:** continuous casting machine, ingot, crystallizer.

*Стаття надійшла до редакції 11.09.2019 р.*