

А.С. Нурадінов, д-р техн. наук, ст. наук. співр., пров. наук. співр., e-mail: nla_73@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

О.В. Ноговіцин, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-2929-5300>

І.А. Нурадінов, аспірант, e-mail: inuradinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

І.Р. Баранов, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: ivanbir@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5692-5297>

К.А. Сіренко, мол. наук. співр., e-mail: thermoexp.metal@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Теплообмінні процеси при валковій розливці-прокатці металів

Фізичним моделюванням вивчені процеси теплообміну між розплавом і валковим кристалізатором при валковій розливці-прокатці металів. На основі теоретичного аналізу теплообмінних процесів між бандажем валкового кристалізатора та охолоджувальною водою визначено можливі важелі їх інтенсифікації: швидкість руху теплоносія, площу та рельєф поверхні тепловідведення. Встановлено закономірності зміни параметрів теплообміну між металом, що твердіє, і водою, що охолоджує кристалізатор, залежно від способів впливу на нього. Показано, що помітне підвищення темпу тепловідведення спостерігається у разі зростання швидкості руху води до певного рівня (до 2,5 м/с). А при збільшенні площі тепловідведення ступінь інтенсифікації теплообмінних процесів в кристалізаторі не залежить від швидкості руху води. Підвищення інтенсивності теплообмінних процесів у кристалізаторі при штучній шорсткості поверхні теплообміну полягає в тому, що при набіганні потоку рідини на виступ за ним утворюється вихор, що руйнує структуру в'язкого підшару, турбулізуючи його. Внаслідок цього при незмінній швидкості руху рідини в'язкий ламінарний підшар повністю руйнується або зменшується за товщиною, що сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі без збільшення гідравлічних втрат. Таким чином, встановлено, що з розглянутих варіантів інструментарію найоптимальнішим з погляду прискорення теплообмінних процесів є метод наведення штучної шорсткості на бандажах валків. Показано, що поряд з інтенсифікацією тепловідведення цей спосіб, за рахунок турбулізації в'язкого ламінарного підшару води, істотно знижує утворення накипу на теплообмінній поверхні. І це, своєю чергою, збільшує періоди профілактичного обслуговування кристалізаторів. На основі отриманих результатів запропоновано практичні рекомендації щодо підвищення ефективності теплової роботи валкового кристалізатора при валковій розливці-прокатці металів.

Ключові слова: валковий кристалізатор, теплообмін, швидкість теплоносія, площа тепловідведення, шорсткість, коефіцієнт тепловіддачі, кількість тепла.

Вступ. У формуванні структури та властивостей литих металургійних заготовок особливу роль відіграє інтенсивність тепловідведення від них. Відомо, що властивості литого металу можуть істотно змінюватися залежно від характеристик кристалічних структур, які визначаються швидкістю кристалізації [1–4]. А при валковій розливці-прокатці металів від швидкості кристалізації залежить і продуктивність процесу загалом. У цій роботі вивчено особливості теплообмінних процесів при валковій розливці металів, а також розглянуто можливі важелі керування ними.

Методика досліджень. Дослідження проведено за розробленою методикою фізичного моделювання на експериментальній установці, що представлена на рис. 1.

Характер теплообмінних процесів між розплавом металу, що твердіє, та кристалізатором визначається геометричними, фізичними та гідродинамічними умовами їх протікання [5–9]. Якщо говорити про валко-

ву розливку металів, то головним лімітуючим етапом процесу теплообміну є передача тепла від бандажів валкових кристалізаторів до охолоджувальної води. Тому в даних дослідженнях саме для цього етапу за допомогою різних інструментів впливали на тепловіддачу від валків-кристалізаторів до охолоджувальної води [10–14], а саме: регульована швидкість руху води вздовж поверхні бандажу валка; збільшення площі поверхні теплообміну на 50 % шляхом наведення на ній поздовжніх ребер; наведення штучної шорсткості на поверхні теплообміну.

Результати досліджень. Для полегшення інтерпретації результатів досліджень проведемо теоретичний аналіз теплового балансу валкового кристалізатора. Тепловий баланс валкового кристалізатора як теплообмінного апарату можна представити так [5]:

$$Q_{\text{поч}} = Q_{\text{в}} + Q_1 + Q_2 + Q_{\text{ух}}, \quad (1)$$

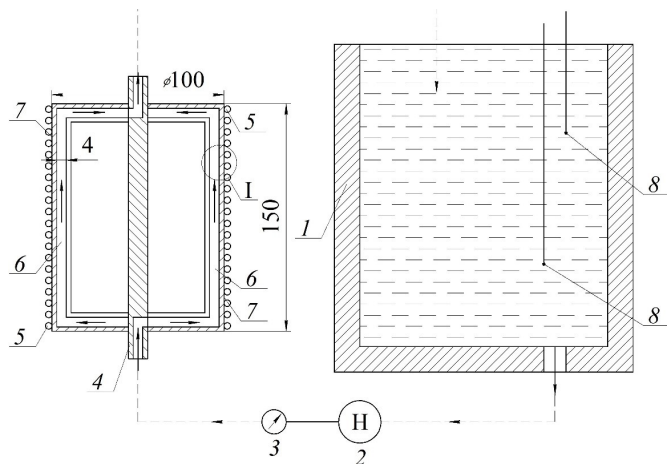


Рис. 1. Схема експериментальної установки вивчення теплообмінних процесів у валковому кристалізаторі: 1 – бак із водою; 2 – насос; 3 – витратомір; 4 – модель валка-кристалізатора; 5 – електричний ТЕН; 6 – канали руху води; 7 та 8 – термопари

де $Q_{\text{поч}}$ – тепло, що вноситься рідким металом в кристалізатор; $Q_{\text{в}}$ – тепло, що відводиться охолоджуючим кристалізатором теплоносієм; Q_1 – втрати тепла на випромінювання через відкриту поверхню металу; Q_2 – втрати тепла на початковий прогрів кристалізатора; $Q_{\text{ух}}$ – тепло, що йде з кристалізатора із заготовкою.

Якщо у виразі (1) значення Q_1 та Q_2 через їх незначність виключити, то тепловий баланс валкового кристалізатора матиме вигляд:

$$Q_{\text{поч}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{ух}} \quad (2)$$

У виразі (2) нас цікавить кількість тепла $Q_{\text{в}}$, що відводиться охолоджувальною водою [5]:

$$Q = Q_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot (t_{2\text{в}} - t_{1\text{в}}) = m \cdot C \cdot (t_{2\text{в}} - t_{1\text{в}}), \quad (3)$$

де $G_{\text{в}}$ – витрати води на кристалізатор; $t_{1\text{в}}$ та $t_{2\text{в}}$ – температура води на вході та виході з кристалізатора; m – маса води у каналах валка; C – питома теплоємність води.

Більш точно кількість тепла ($Q_{\text{в}}$), що відводиться з поверхні валка за один цикл проходження охолоджувальної води, можна визначити за такою формулою [15]:

$$Q_{\text{в}} \approx \alpha \cdot F \cdot \Delta t \cdot \tau, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі до охолоджувальної води; F – площа поверхні теплообміну валка; Δt – перепад температури між поверхнею валка та охолоджувальною водою; τ – тривалість теплообміну між однією порцією води, що охолоджує, і валком.

Спільним рішенням рівнянь (3) та (4) можна визначити коефіцієнт тепловіддачі до охолоджувальної води:

$$\alpha = \frac{m \cdot C \cdot (t_{2\text{в}} - t_{1\text{в}})}{\Delta t \cdot F \cdot \tau}. \quad (5)$$

Стійкість процесу беззлиткової прокатки металевих сплавів забезпечується при затвердінні на поверхнях валків-кристалізаторів 10–15 % обсягу роз-

плаву між валками [16, 17]. Відповідно, за відомими параметрами розплаву металу між валками можна визначити мінімальну кількість тепла ($Q_{\text{мін}}$), яку необхідно відвести за один оборот валків:

$$Q_{\text{мін}} = Q_{\text{пер}} + Q_{\text{кр}}, \quad (6)$$

де $Q_{\text{пер}}$ – тепло перегріву розплаву металу; $Q_{\text{кр}}$ – теплота кристалізації металу.

З проведеного аналізу теплового балансу валкового кристалізатора слідує, що для забезпечення стабільності процесу беззлиткової прокатки металів має дотримуватися умова $Q_{\text{в}} > Q_{\text{мін}}$.

Встановлення закономірностей теплообміну між рідким металом та валковим кристалізатором є дуже важливим завданням з погляду управління процесом беззлиткової прокатки металів. В якості вихідних даних для початку були визначені параметри теплообміну між валком-кристалізатором і охолоджувальною водою при різних швидкостях витягування заготовок (рис. 2). Видно, що інтенсивність теплообміну між кристалізатором і охолоджувальною водою істотно знижується при підвищенні лінійної швидкості розливки. Головний висновок цього рисунка полягає в тому, що швидкість валкової розливки для алюмінієвих сплавів, близьких до чистого алюмінію, повинна відповідати умові $W_p \leq 0,75$ м/с. Це пов'язано з тим, що при підвищенні швидкості розливки знижується тривалість контактного теплообміну між металом, що розливається, і кристалізатором, отже, зменшується кількість відведеного охолоджувальною водою тепла. Наприклад, при лінійній швидкості розливки розплаву $W_p = 0,05$ м/с тривалість теплообміну між кристалізатором та металом становить ≈ 6 с, а при $W_p = 0,5$ м/с – $\approx 0,6$ с, тобто у 10 разів менше. А із залежності (4) слідує, що кількість тепла, що відводиться охолоджувальною водою, прямо пропорційно тривалості процесу теплообміну в кристалізаторі.

Виходячи з того, що лінійна швидкість валкової розливки металів залежить від теплообмінних процесів у кристалізаторі, в роботі апробовані різні інстру-

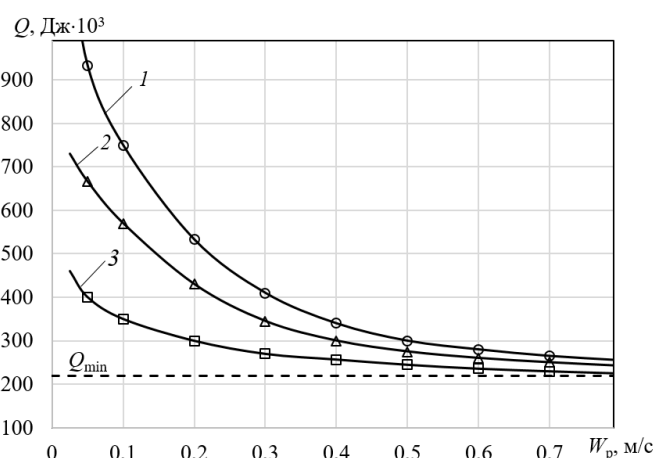


Рис. 2. Залежність кількості тепла, що відводиться охолоджувальною водою, від швидкості розливки: 1 – при перегріві розплаву металу $\Delta t_{\text{пер}} = 40$ °C; 2 – $\Delta t_{\text{пер}} = 20$ °C; 3 – $\Delta t_{\text{пер}} = 10$ °C

Параметри теплообміну у валковому кристалізаторі

№№ п/п	Параметр теплообміну						
	W_B , м/с	τ , с	$\alpha_B \cdot 10^3$ Вт/м ² ·°С	$Q_B \cdot 10^3$ Вт/м ² ·°С	$\Delta P \cdot 10^6$ Па	t_m , °С	t_{1B} , °С
1.	0,2	1,0	15,9	515	0,158	700 ± 5	15 ± 2
2.	0,5	0,4	42,4	546	0,987		
3.	1,0	0,2	90,7	584	3,95		
4.	1,5	0,13	147,5	618	8,89		
5.	2,0	0,1	202,5	652	15,8		
6.	2,5	0,08	260,8	673	24,7		
7.	3,0	0,067	318,6	685	35,6		
8.	4,0	0,05	432,3	696	63,2		
9.	6,0	0,033	667,9	708	142,2		
10.	8,0	0,025	887,6	719	252,8		
11.	10,0	0,02	1137,5	728	395,0		

ментарії для підвищення інтенсивності цих процесів (регульована швидкість руху охолоджувальної води, збільшення площі поверхонь теплообміну бандажів валків, наведення штучної шорсткості на поверхнях теплообміну).

Результати, отримані в ході досліджень, показують, що змінюючи швидкість руху охолоджувальної води в каналах валків-кристалізаторів, можна керувати інтенсивністю теплообмінних процесів у них (таблиця). У цій таблиці наведено параметри теплообміну між охолоджувальною водою та кристалізатором залежно від швидкості її руху вздовж поверхні теплообміну при лінійній швидкості обертання валка, що дорівнює 0,3 м/с. Видно, що до рівня зростання значень швидкостей руху води (до 2,5 м/с) спостерігається помітне збільшення темпу тепловідведення, а при подальшому збільшенні швидкості руху води цього не відбувається. Зазначимо, що при зростанні у п'ятдесят разів швидкості руху води кількість тепла, що відводиться, збільшується всього лише на 61 %. Отримані для валкового кристалізатора результати добре корелюють з відомими в області атомної та теплової енергетики дослідженнями, в яких встановлено, що оптимальна швидкість руху теплоносія для різних конструкцій теплообмінників знаходиться в межах від 1,5 до 2,5 м/с [18, 19]. При використанні цього прийому управління теплообмінними процесами в кристалізаторах будь-якого типу необхідно враховувати, що підвищення швидкості руху для будь-яких краплинних рідин призводить до значних втрат гідравлічного напору на подолання сил тертя. Для таких рідин втрати гідравлічного напору (ΔP) на подолання сил тертя можна визначити за формулою [20]:

$$\Delta P = \xi_m \cdot \rho \cdot \frac{W^2}{2}, \quad (7)$$

де ξ_m – коефіцієнт гідравлічного тертя; ρ – щільність теплоносія; W – швидкість руху теплоносія.

Розрахунки показали, що при 50-кратному збільшенні швидкості руху води втрати гідравлічного напору підвищуються на три порядки (таблиця). З чого випливає, що з використанням цього прийому управління теплообмінними процесами у валковому кристалізаторі кратно підвищуються енергетичні витрати на його реалізацію. В результаті різкого збільшення тиску води у всій системі охолодження кристалізатора при цьому суттєво підвищуються вимоги до механічних характеристик всіх деталей конструкції. І це зумовлює додаткові технічні складності за практичної реалізації цього та відносно низьку економічну ефективність.

Відносно більш висока ефективність теплової роботи кристалізатора виходить при двох інших використаних прийомах інтенсифікації теплообмінних процесів в ньому (рис. 3). З даного рисунка привертає увагу той факт, що для ребристих поверхонь (тобто при збільшенні площі тепловідведення) ступінь інтенсифікації теплообмінних процесів в кристалізаторі не залежить від швидкості руху води (рис. 3, криві 1 і 2). 50 % збільшення площі поверхні теплообміну бандажів валків підвищує кількість тепла, що відводиться водою, лише на 6 ÷ 16 % залежно від швидкості її руху, тобто кількість тепла, що відводиться водою, підвищується не так само, як і збільшення площі поверхні теплообміну. Ймовірно, це пов'язано з тим, що згідно з формулою (5) збільшення площі поверхні теплообміну знижує значення коефіцієнта тепловіддачі від бандажів валків до охолоджуючої води.

Зовсім інший характер теплообмінних процесів у кристалізаторі ми спостерігаємо при штучній шорсткості на поверхні тепловідведення (рис. 3, криві 1 та 3). Видно, що поперечні виступи істотно підвищують кількість тепла, що відводиться охолоджувальною водою. Наприклад, при постійній невеликій

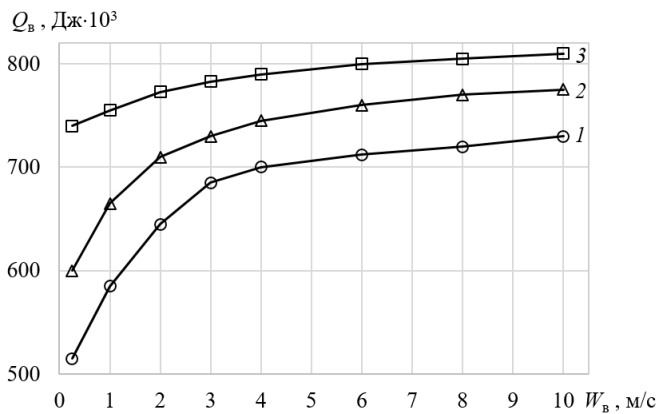


Рис. 3. Залежність тепла, що відводиться у валковому кристалізаторі, від швидкості руху охолоджуючої води: 1 – при гладкому рельєфі поверхні теплообміну бандажа валка; 2 – для бандажа з поздовжніми ребрами; 3 – для бандажа з поперечною шорсткістю

швидкості руху води вздовж поверхні теплообміну (0,2 м/с) кількість тепла, що нею відводиться, збільшується на 45 %. Ймовірно, це пов'язано зі структурою гідродинамічного прикордонного шару потоку води на поверхні теплообміну. З теорії прикордонного шару відомо, що при русі потоку рідини (або газу) вздовж гладкої поверхні на ній формується прикордонний гідродинамічний шар з різною структурою за напрямком перебігу та перерізу (рис. 4) [21].

При малих значеннях чисел Рейнольдса ($Re < 2 \dots 5 \cdot 10^5$) режим руху рідини по всьому перерізу потоку в циркуляційному каналі кристалізатора має ламінарний характер. Але в металургійній практиці у будь-яких типах кристалізаторів значення чисел Рейнольдса завжди відповідають умові $Re \geq 2 \dots 5 \cdot 10^5$, тобто по всьому перетині потоку маємо турбулентний характер руху рідини. Але навіть і при турбулентному характері руху рідини в потоці завжди є гідродинамічний прикордонний шар, структура якого складається з перехідної зони і в'язкого ламінарного підшару (рис. 4). Саме в'язкий ламінарний підшар істотно лімітує теплопередачу між обтічною поверхнею і рідиною. Товщина цього в'язкого підшару ($\delta_{в.п.}$) залежить від розміру турбулентного ядра потоку (δ_m) і визначається із співвідношень [21]:

$$\delta_{в.п.} = 0,01 \cdot \delta_m \quad (8)$$

Товщину турбулентного ядра в потоці рідини можна визначити з наступної залежності [21]:

$$\delta_m = \frac{0,37 \cdot X}{Re^{0,3}}, \quad (9)$$

де X – відстань від кромки обтікаємої поверхні до розглянутої точки.

Якщо виходити з того, що товщина в'язкого підшару становить близько 0,01 частини загальної товщини турбулентного ядра (8), то з формули (9) слідує, що з віддаленням від кромки кристалізатора товщина цього підшару буде збільшуватися.

Якщо структуру потоку в цілому розглядати з позиції теплообміну між поверхнею і рідиною, що набігає,

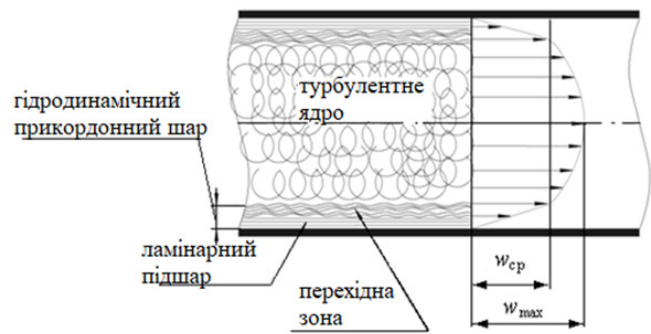


Рис. 4. Структура потоку рідини під час його руху вздовж гладкої поверхні

то можна зробити висновок, що у в'язкому ламінарному підшарі тепло передається теплопровідністю, а в турбулентному ядрі – конвекцією (рис. 4). Отже, у загальному перенесенні тепла лімітуючою стадією є теплопередача теплопровідністю у в'язкому ламінарному підшарі. Тоді коефіцієнт тепловіддачі (α) від поверхні теплообміну до потоку рідини можна визначити з наступного виразу [21]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta_{в.п.}}, \quad (10)$$

де λ – теплопровідність рідини (теплоносія); $\delta_{в.п.}$ – товщина в'язкого ламінарного підшару.

Отже, можна припустити, що посилення відведення тепла від поверхні теплообміну зі штучною шорсткістю до охолоджувальної води пов'язане з руйнуванням в'язкого ламінарного підшару в прикордонному гідродинамічному шарі або зменшенні його товщини. На наш погляд, механізм підвищення інтенсивності теплообмінних процесів у кристалізаторі при штучній шорсткості поверхні теплообміну полягає в тому, що при набіганні потоку рідини на виступ за ним утворюється вихор, що руйнує структуру в'язкого підшару, турбулізуючи його (рис. 5). Внаслідок цього при незмінній швидкості руху рідини в'язкий ламінарний підшар повністю руйнується або зменшується за товщиною, що сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі без збільшення гідравлічних втрат.

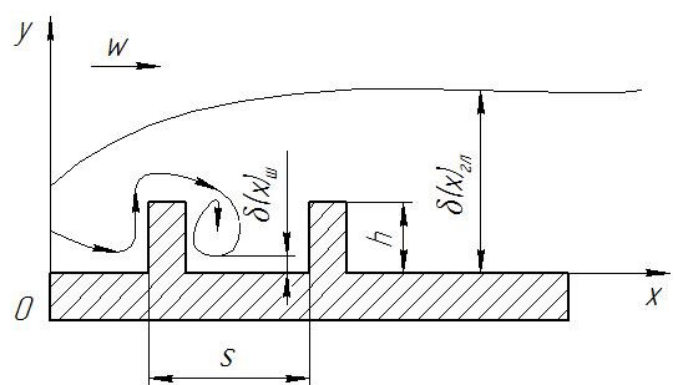


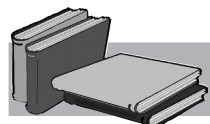
Рис. 5. Схема руйнування в'язкого ламінарного підшару в потоці рідини за наявності на поверхні контакту шорсткості у вигляді виступів

При такому рельєфі поверхні теплообміну для оптимальної теплової роботи кристалізатора необхідно забезпечити такі умови: висота виступів не повинна перевищувати товщину в'язкого ламінарного підшару у гідродинамічному прикордонному шарі, щоб не збільшувалися втрати гідравлічного напору; вихор, що виникає за виступом, повинен припинити своє існування до зустрічі з наступним виступом (рис. 5), інакше він переходить у ядро потоку і створюватиме додатковий гідравлічний опір; оптимальне співвідношення відстані між виступами до їх висоти, за якого досягається максимальна тепловіддача, має відповідати умові $s/h \approx 13$ [13].

ми процесами в кристалізаторах при валковій розливці металів. З прикладної точки зору з розглянутих варіантів прийомів найбільш оптимальним є метод наведення шорсткості на бандажах валків, тому що інтенсифікація теплообмінних процесів в кристалізаторі відбувається без збільшення втрат гідравлічного напору. Крім цього, турбулізація в'язкого ламінарного підшару води істотно знижує утворення накипу на поверхнях тепловідвідних бандажів валків. Накип, що утворюється на поверхнях бандажів валків-кристалізаторів, по-перше, є додатковим термічним опором і, по-друге, зменшує періоди їх профілактичного обслуговування.

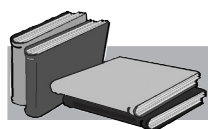
Висновки

Отримані результати показують, що, використовуючи різні прийоми, можна управляти теплообмінни-



ЛІТЕРАТУРА

1. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в стали и сплавах. Москва: Металлургия, 1977. 222 с.
2. Лякишев Н.П. Конструкционные и некоторые функциональные материалы, настоящее и будущее. *Современное материаловедение XX столетия*. Киев: Наук. думка, 1998. 296 с.
3. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. Москва: Металлургия, 1987. 224 с.
4. Szekely Von J., Themelis N.J. Rate Phenomena in Process Metallurgy. Wiley Interscience, a Division of John Wiley & Sons Inc., New York-London-Sydney-Toronto, 1971. 754 p.
5. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок. Москва: Металлургия, 1991. 216 с.
6. Евтеев Д.П., Колыбалов И.Н. Непрерывное литье стали. Москва: Металлургия, 1984. 198 с.
7. Сладкоштьев В.Т., Потанин Р.В., Суладзе О.Н. и др. Непрерывная разливка стали на радиальных установках. Москва: Металлургия, 1974. 298 с.
8. Дымнич А.Х., Троянский А.А. Вопросы тепломассообмена в сталеплавильных процессах. Донецк: ДВНЗ «Дон-НТУ», 2009. 582 с.
9. Боршанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И. Жидкометаллические теплоносители. Москва: Атомиздат, 1976. 146 с.
10. Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С., Дымнич А.Х., Нурадинов И.А. Способ оптимизации тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ. *Процессы литья*. 2016. № 2. С. 42–51.
11. Нурадинов А.С., Эльдарханов А.С., Ахтаев С.С.-С., Уздиева Н.С. Скорость движения теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ как фактор интенсификации теплообменных процессов в нем. *Сталь*. 2017. № 3. С. 19–21.
12. Нурадинов А.С., Ноговицын А.В., Нурадинов И.А. Методика определения коэффициента теплоотдачи теплоносителя в кристаллизаторе МНЛЗ. *Процессы литья*. 2017. № 2. С. 45–52.
13. Нурадинов А.С., Ноговицын А.В., Нурадинов И.А., Баранов И.Р. Влияние формы поверхности теплообмена на эффективность тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ. *Процессы литья*. 2017. № 3. С. 43–51.
14. Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Уздиева Н.С., Нурадинов И.А. Оптимизация тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ. *Металлург*. 2019. №1. С. 17–23.
15. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. Москва: Новые технологии, 2004. 784 с.
16. Sarioglu K., Thevoz K. Simulation of solidification process used in twin roll casting. *Light metals Warrendale Proceedings*. Warrendale: TMS, 2003. P. 747–752.
17. Zeng J., Koitzsch R., Pfeifer H., Friedrich B. Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. P. 2321–2328.
18. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия, 1977. 344 с.
19. Кузнецов В.Д. Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России. Сб. науч. трудов. Москва: Издательство МЭИ, 1999. 280 с.
20. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. Учебник для вузов. Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. 562 с.
21. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепло-массообменных процессов. Казань: Издательство Казанского университета, 2007. 500 с.



REFERENCES

1. Golikov, I.N., Maslenkov, S.B. (1977). Dendritic segregation in steel and alloys. Moscow: Metallurgiya, 222 p. [in Russian].
2. Lyakishev, N.P. (1998). Structural and some functional materials, present and future. *Modern materials science of the twentieth century*. Kyiv: Nauk. dumka, 296 p. [in Russian].
3. Borisov, V.T. (1987). Theory of a two-phase zone of a metal ingot. Moscow: Metallurgiya, 224 p. [in Russian].
4. Szekely, Von J., Themelis, N.J. (1971). Rate Phenomena in Process Metallurgy. Wiley Interscience, a Division of John Wiley & Sons Inc., New York-London-Sydney-Toronto, 754 p.
5. Skvortsov, A.A., Akimenko, A.D., Ulyanov, V.A. (1991). Influence of external influences on the process of formation of ingots and blanks. Moscow: Metallurgiya, 216 p. [in Russian].
6. Evteev, D.P., Kolybalov, I.N. (1984). Continuous casting of steel. Moscow: Metallurgiya, 198 p. [in Russian].
7. Sladkoshteev, V.T., Potanin, R.V., Suladze, O.N. et al. (1974). Continuous casting of steel in radial plants. Moscow: Metallurgiya, 298 p. [in Russian].
8. Dymnich, A.Kh., Troyansky, A.A. (2009). Issues of heat and mass transfer in steelmaking processes. Donetsk: DVNZ "DonNTU", 582 p. [in Russian].
9. Borshansky, V.M., Kutateladze, S.S., Novikov, I.I. (1976). Liquid metal coolants. Moscow: Atomizdat, 146 p. [in Russian].
10. Nuradinov, A.S., Eldarkhanov, A.S., Dymnich, A.Kh., Nuradinov, I.A. (2016). Method for optimizing the thermal operation of the CCM mold. *Casting processes*, no. 2, pp. 42–51 [in Russian].
11. Nuradinov, A.S., Eldarkhanov, A.S., Akhtaev, S.S.-S., Uzdieva, N.S. (2017). The speed of movement of the coolant in the mold CCM as a factor of intensification of heat exchange processes in it. *Stal'*, no. 3, pp. 19–21 [in Russian].
12. Nuradinov, A.S., Nogovitsyn, A.V., Nuradinov, I.A. (2017). Method for determining the heat transfer coefficient of the coolant in the CCM mold. *Casting processes*, no. 2, pp. 45–52 [in Russian].
13. Nuradinov, A.S., Nogovitsyn, A.V., Nuradinov, I.A., Baranov, I.R. (2017). Influence of the shape of the heat exchange surface on the efficiency of the thermal operation of the CCM mold. *Casting processes*, no. 3, pp. 43–51 [in Russian].
14. Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S., Uzdieva, N.S., Nuradinov, I.A. (2019). Optimization of thermal operation of CCM mold. *Metallurg*, no. 1, pp. 17–23 [in Russian].
15. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (2004). Technologies of modern metallurgy. Moscow: Novye tekhnologii, 784 p. [in Russian].
16. Sarioglu, K., Thevoz, K. (2003). Simulation of solidification process used in twin roll casting. *Light metals Warrendale Proceedings*. Warrendale: TMS, pp. 747–752.
17. Zeng, J., Koitzsch, R., Pfeifer, H., Friedrich, B. (2009). Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp. 2321–2328.
18. Mikheev, M.A., Mikheeva, I.M. (1977). Fundamentals of heat transfer. Moscow: Energiya, 344 p. [in Russian].
19. Kuznetsov, V.D. (1999). Scientific research in the field of nuclear energy in technical universities in Russia. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 280 p. [in Russian].
20. Tsvetkov, F.F., Grigoriev, B.A. (2011). Heat and mass transfer. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 562 p. [in Russian].
21. Laptev, A.G. (2007). Boundary layer models and calculation of heat and mass transfer processes. Kazan: Kazan University Press, 500 p. [in Russian].

Received 11.04.2022

Summary

A.S. Nuradinov, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Leading Researcher, e-mail: nla_73@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7286-8648>

O.V. Nogovitsyn, Dr. Sci. (Engin.), Senior Research Scientist, Head of the Department, e-mail: alexey.nogovitsyn@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2929-5300>

I.A. Nuradinov, Postgraduate Student, e-mail: inuradinov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8916-5247>

I.R. Baranov, PhD (Engin.), Research Scientist, e-mail: ivanbir@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5692-5297>

K.A. Sirenko, Junior Researcher, e-mail: thermoexp.metal@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

Heat exchange processes in roll casting-rolling of metals

Physical modeling has been used to study the processes of heat exchange between the melt and the roll crystallizer with roll casting-rolling of metals. Based on the theoretical analysis of heat exchange processes between the bandage of the roll crystallizer and the cooling water, the possible levers of their intensification are determined: the speed of the coolant, the area and relief of the heat sink surface. Regularities of change of parameters of heat exchange between the hardening metal and the water cooling the crystallizer, depending on ways of influence on it are established. It is shown that a significant increase in the rate of heat dissipation is observed in the case of increasing the speed of water movement to a certain level (up to 2.5 m/s). And with increasing the area of heat dissipation, the degree of intensification of heat transfer processes in the mold does not depend on the speed of water movement. Increasing the intensity of heat transfer processes in the mold at the artificial roughness of the heat transfer surface is that when the flow of liquid on the ledge behind it a vortex is formed, which destroys the structure of the viscous sublayer, turbulizing it. As a result, at a constant velocity of the fluid, the viscous laminar sublayer is completely destroyed or decreases in thickness, which increases the heat transfer coefficient without increasing hydraulic losses. Therefore, it is established that the most optimal of the considered tool options in terms of accelerating heat transfer processes is the method of inducing artificial roughness on the bandages of the rolls. It is shown that along with the intensification of heat dissipation, this method, due to the turbulence of the viscous laminar sublayer of water, significantly reduces the formation of scale on the heat exchange surface. And this, in turn, increases the periods of preventive maintenance of the molds. Based on the obtained results, practical recommendations for improving the efficiency of thermal work of the roll crystallizer in roll casting-rolling of metals are proposed.

Keywords

Roll crystallizer, heat transfer, coolant velocity, heat dissipation area, roughness, heat transfer coefficient, heat quantity.