

УДК 621.746.27

Ніколаєнко Анатолій Миколайович, професор, кандидат технічних наук
Трегулова Ільміра Павлівна, магістрант
Барищенко Олена Миколаївна, доцент, кандидат технічних наук

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ В РОТОРНІЙ ЛИВАРНІЙ МАШИНІ

Запорізька державна інженерна академія

Виконано дослідження теплообміну в роторній ливарній машині. Встановлено, що для рівномірного охолодження зливка витрата води, яку подають з різних боків кристалізатора, має бути узгодженою з коефіцієнтами теплопередачі, які розраховано за відповідними напрямками теплообміну та довжиною зливка.

Ключові слова: теплообмін, ливарна машина, кристалізатор, коефіцієнт теплопередачі, виливниця

Вступ. Під час виробництва алюмінієвої катанки заданої якості на ливарно-прокатних агрегатах (ЛПА) головним завданням у процесі лиття є одержання заготовки з певною стабільною структурою. Проте коливання температури розплаву, а також залежність швидкості лиття від продуктивності прокатного стану істотно впливають на процес кристалізації зливка [1]. У зв'язку з цим для одержання заготовки бажаної якості необхідно забезпечувати стабільні умови кристалізації рідкого металу або здійснювати управління процесом його твердіння. В обох випадках досягнення позитивного результату є неможливим без дослідження особливостей теплообміну між розплавом і кристалізатором.

Аналіз проблеми. В ЛПА для виробництва алюмінієвої катанки застосовують роторні ливарні машини з кільцевою мідною виливницею за периметром сталевго колеса, яка має канал з трапецієвидним перерізом і зовні охоплюється нескінченною сталевгою стрічкою.

Існує декілька найбільш характерних схем роторних ливарних машин [2-4], головна відмінність яких полягає у способі охоплення колеса сталевгою стрічкою (рис. 1).

Оскільки кільцева виливниця під час роботи обертається разом з ливарним колесом, то рідкий алюміній, що горизонтально подають до неї, безперервно заповнює об'єм між стінками виливниці та сталевгою стрічкою. Для поступової кристалізації металу виливниця з усіх боків оточено регульованими водяними форсунками. Окрім того, воду подають і у внутрішню порожнину колеса.

На початку охолодження, коли рідкий алюміній, нагрітий до температури 690-720 °С, безпосередньо стикається зі стінками кристалізатора, відбувається інтенсивне відведення теплоти та пониження температури металу до 600 °С.

Створюється тонка кірка металу, алюміній дає усадку та між поверхнями зливка, сталевго стрічки та стінкою виливниці виникає проміжок, що заповнено газом. В результаті термічний опір переходу «метал-стінка кристалізатора (сталевга стрічка)» збільшується, щільність теплового потоку знижується та швидкість твердіння розплаву падає. Товщина газового проміжку за довжиною зливка є неоднаковою і змінюється протягом часу. Проте її максимальна величина не перевищує 10 мкм [5].

Таким чином, увесь складний процес теплопередачі в ливарному колесі можна розділити на декілька етапів: передавання теплоти від рідкого металу до поверхні твердої кірки, що утворилася; через кірку зливка; від поверхні зливка через газовий проміжок до стінки мідної виливниці і сталевго стрічки; через мідну стінку виливниці; через сталевгу стрічку; від мідної стінки до сталевих дисків ливарного колеса; через сталеві диски і від мідної стінки виливниці, сталевих дисків і сталевго стрічки до води, що охолоджує.

Постановка завдання. Для забезпечення рівномірного твердіння зливка в процесі кристалізації розплаву необхідно дослідити теплообмін у роторній ливарній машині та сформулювати рекомендації щодо охолодження кристалізатора.

Основна частина досліджень. Загальна кількість теплоти Q , яка підводиться з рідким алюмінієм до виливниці кристалізатора, витрачається на її нагрівання $Q_{вил}$, нагрівання сталевго стрічки $Q_{стс}$, що охоплює мідну виливницю, нагрівання сталевих дисків $Q_{стд}$ ливарного колеса та нагрівання газового проміжку $Q_{пр}$. Частина теплоти втрачається з водою $Q_{вод}$, що охолоджує кристалізатор, а невитрачена теплота виводиться з кристалізатора із затверділою заготовкою $Q_{заг}$ (рис. 2).

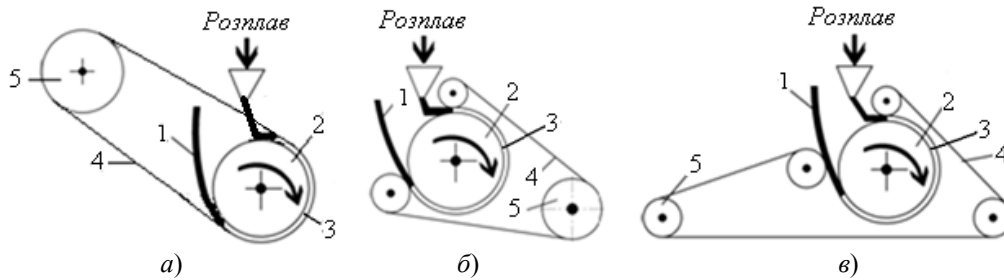


Рисунок 1 – Схеми охоплення ливарного колеса сталевією стрічкою:

a - двоколісний кристалізатор; *б* - чотириколісний кристалізатор; *в* - п'ятиколісний кристалізатор; 1 - заготовка; 2 - ливарне колесо; 3 - виливниця; 4 - сталава нескінченна стрічка; 5 - натяжне колесо

З урахуванням теплоти, яка виділяється під час кристалізації зливка $Q_{кр}$, втрат теплоти на термічних опорах забруднень (накипання) $Q_{заб}$, що утворюються на внутрішній і зовнішній поверхнях виливниці, яку охолоджує вода, а також втрат теплоти до доквілля $Q_{дов}$, рівняння теплового балансу кристалізатора матиме вигляд:

$$Q + Q_{кр} = Q_{вод} + Q_{вил} + Q_{стс} +$$

$$+ Q_{стд} + Q_{пр} + Q_{заб} + Q_{дов} + Q_{заг} \quad (1)$$

Для дослідження особливостей теплообміну в роторній ливарній машині необхідно визначити кількість теплоти, що одержує кристалізатор від алюмінієвого розплаву, та її витрати протягом твердіння зливка.

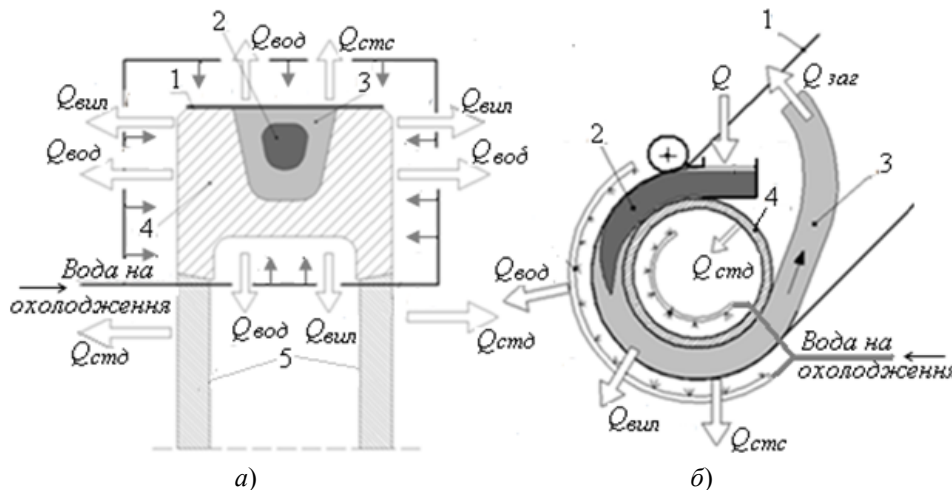


Рисунок 2 – Поперечний (а) і поздовжній (б) переріз ливарного колеса та схема матеріальних і теплових потоків: 1 - сталава стрічка; 2 - рідка фаза заготовки; 3 - тверда фаза заготовки; 4 - виливниця кристалізатора; 5 - сталеві диски ливарного колеса

Під час розрахунків використовували теплофізичні характеристики алюмінієвого сплаву А5Е, міді, сталі 40, повітря та води [6-8], конструктивні характеристики ливарної машини ЛПА «LY-1600» (КНР) [9], а також умови твердіння розплаву в кристалізаторі. Витрату води на охолодження зливка приймали однаковою з усіх боків кристалізатора.

Приходну частину теплового балансу, що вміщує кількість теплоти, яку підводить алюмінієвий сплав Q до виливниці, та приховану теплоту кристалізації $Q_{кр}$, розраховували за допомогою формули [10]:

$$Q + Q_{кр} = \frac{\rho \cdot V}{60} \cdot F \cdot h_{роз} \quad (2)$$

де ρ – щільність алюмінієвого сплаву за $t_0 = 0^\circ\text{C}$, $\text{кг}/\text{м}^3$, $\rho = 2,7 \text{ кг}/\text{м}^3$; V – швидкість лиття, $\text{м}/\text{хв.}$, $V = 12 \text{ м}/\text{хв.}$; F – площа поперечного перерізу заготовки, м^2 , $F = 0,23 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; $h_{роз}$ – ентальпія розплаву, яка відлічена від температури $t_0 = 0^\circ\text{C}$ та враховує приховану теплоту затвердіння зливка:

$$h_{роз} = L + c \cdot t_{роз} \quad (3)$$

де L – теплота твердіння розплаву, $\text{кДж}/\text{кг}$, $L = 362,3 \text{ кДж}/\text{кг}$; c – середня масова теплоємність сплаву в діапазоні температур $t_0 - t_{роз}$,

кДж/(кг·°C), $c = 1044$ кДж/(кг·°C); $t_{роз}$ – температура розплаву, °C, $t_{роз} = 700$ °C.

Розрахунки витратної частини теплового балансу здійснювали з урахуванням багатощарової системи теплопередачі у кристалізаторі ливарного колеса.

Зазвичай тепловий потік за контактним теплообміном визначають за допомогою основного рівняння теплопередачі [11]:

$$Q = K \cdot (T_1 - T_2) \cdot F, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); T_1 , T_2 – температура гарячого та холодного носіїв, відповідно, К; F – площа поверхні теплообміну, м².

У системах зі складним видом перенесення теплоти, до яких відносять теплообмін у кристалізаторі, коефіцієнт теплопередачі розраховують з використанням формули [11]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

де δ_i – товщина i -тої стінки, м; λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -тої стінки, Вт/(м²·К); α_1 , α_2 – відповідно коефіцієнти тепловіддачі від гарячого теплоносія до розділювальної стінки та від стінки до холодного теплоносія, Вт/(м²·К); $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – сума термічних опорів

усіх шарів стінки та забруднення, (м²·К)/Вт, $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = r + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}$; $r_{заб}$ – термічний опір забруднень (накипання води), (м²·К)/Вт; $r_{заб} = \delta_{заб} / \lambda_{заб}$; $\lambda_{заб}$ – коефіцієнт теплопровідності накипання води, Вт/(м·°К), $\lambda_{заб} = (0,2-5,0)$ Вт/(м·°К) [12].

Під час розрахунків витратних статей теплового балансу кристалізатора $Q_{вил}$, $Q_{стс}$, $Q_{стд}$, $Q_{нр}$ і $Q_{заб}$ термічний опір багатощарової стінки визначали з урахуванням конкретних умов теплообміну. Так, для $Q_{вил}$ враховували термічний опір твердої кірки, газового проміжку, мідної стінки виливниці та забруднень на її поверхні; для $Q_{стс}$ – термічний опір твердої кірки, газового проміжку, сталевій стрічці та забруднення її внутрішньої поверхні; для $Q_{стд}$ – термічний опір твердої кірки, газового проміжку, мідної стінки виливниці, забруднення її внутрішньої поверхні та сталевих дисків; для $Q_{нр}$ – термічний опір твердої кірки та газового проміжку, а для $Q_{заб}$ – термічний опір твердої кірки, газового проміжку та забруднень.

Втрати теплоти до доквілля $Q_{дов}$ приймали 3-5 % за аналогією з теплообмінними апаратами [13].

Результати розрахунків коефіцієнтів теплопередачі від розплаву до мідної виливниці $K_{вил}$, від розплаву до сталевій стрічці $K_{стс}$, від розплаву до сталевих дисків $K_{стд}$, від розплаву до газового проміжку $K_{нр}$ та від розплаву до забруднень $K_{заб}$ подано у табл. 1.

Коефіцієнти тепловіддачі від рідкого алюмінію до твердої кірки α_1 та від мідної виливниці до охолоджувальної води α_2 , обчислювали відповідно до існуючої методики [14].

Таблиця 1 – Результати розрахунків коефіцієнтів теплопередачі

| Коефіцієнти теплопередачі та тепловіддачі | Розмірність | Чисельне значення |
|---|------------------------|-------------------|
| $K_{вил}$ | Вт/(м ² ·К) | 760 |
| $K_{стс}$ | Вт/(м ² ·К) | 785 |
| $K_{стд}$ | Вт/(м ² ·К) | 593 |
| $K_{нр}$ | Вт/(м ² ·К) | 1372 |
| $K_{заб}$ | Вт/(м ² ·К) | 760 |
| α_1 | Вт/(м ² ·К) | 2100 |
| α_2 | Вт/(м ² ·К) | 3019 |

Кількість теплоти, що відводиться з охолоджувальною водою $Q_{вод}$, визначали за формулою [15]:

$$Q_{вод} = c_w \cdot G_{кр} \cdot \Delta t_w, \quad (6)$$

де c_w – теплоємність води, кДж/(кг·К); $G_{кр}$ – витрата води, яку подають до кристалізатора, кг/с, $G_{кр} = (4,9-6,3)$ кг/с; Δt_w – різниця між температурою води, що подають (293 К) та відводять (303 К).

Фізичну теплоту, що виноситься заготовкою з кристалізатора $Q_{заг}$ визначали як різницю між статтями приходу та витрати:

$$Q_{заг} = Q + Q_{кр} - (Q_{вод} + Q_{вил} + Q_{стс} + Q_{стд} + Q_{нр} + Q_{заб} + Q_{дов}). \quad (7)$$

Результати розрахунків статей теплового балансу подано у табл. 2.

Для перевірки правильності виконаних розрахунків за формулою (7) теплоту, яку виносить заготовка з кристалізатора $Q_{заг}$ додатково обчислювали за формулою [14]:

$$Q_{заг} = Q - G \cdot (h_n - h_k), \quad (8)$$

де $G \cdot (h_n - h_k)$ – теплота, що віддається гарячим теплоносієм, Вт; G – витрата розплаву, що визначається продуктивністю агрегату та швидкіс-

тю лиття, кг/с, $G = 1,26$ кг/с; h_n – ентальпія сплаву на початку виливниці, $h_n = L + c_n \cdot T_n$; h_k – ентальпія сплаву у кінці виливниці, $h_k = L + c_k \cdot T_k$; T_n, T_k – початкова (973) та – кінцева (625) температура алюмінієвого сплаву у виливниці, відповідно, К; c_n, c_k – теплоємність алюмінієвого сплаву, відповідно, для початкової та кінцевої температури, кДж/(кг·°С). $c_n = 1250$ кДж/(кг·°С), $c_k = 1027$ кДж/(кг·°С).

Таблиця 2 – Результати розрахунків статей теплового балансу

| Статті балансу | Q , Вт | Q , % |
|----------------|----------|---------|
| $Q_{вил}$ | 77962,7 | 8,5 |
| $Q_{стс}$ | 16399,9 | 1,8 |
| $Q_{стд}$ | 4270,8 | 0,5 |
| $Q_{вод}$ | 216455,4 | 23,7 |
| $Q_{пр}$ | 128817,2 | 14,0 |
| $Q_{дов}$ | 32019,0 | 3,5 |
| $Q_{заб}$ | 51074,2 | 5,6 |
| $Q_{заг}$ | 387830,9 | 42,4 |
| Q | 914830,3 | 100,0 |

Результати перевірки показали високе збігання значень $Q_{заг}$; відносна похибка складає 1,7 %.

Таким чином, дослідженням теплового балансу встановлено, що найбільші втрати теплоти пов'язані з водяним охолодженням кристалізатора, ~ 24 %. Враховуючи те, що решта статей витратної частини балансу визначаються конструктивними особливостями кристалізатора та залишаються незмінними протягом його роботи, управління процесом охолодження зливка можливе тільки через коригування кількості теплоти, що уноситься з водою. Причому кількість подавання охолоджувальної води з різних боків кристалізатора має бути узгодженою з коефіцієнтами теплопередачі, що знайдені за різними напрямками теплообміну. Як показали розрахунки коефіцієнтів, для одержання рівномірного охолодження зливка необхідно більш ефективно охолоджувати кристалізатор з боку внутрішньої порожнини ливарного колеса, де коефіцієнт теплопередачі є найменшим ($K_{стд} = 593$ Вт/(м²·К). У той же час інтенсивність охолодження кристалізатора з боку сталеві стрічки має бути найменшою, оскільки тут коефіцієнт теплопередачі є найбільшим: $K_{стс} = 785$ Вт/(м²·К).

Враховуючи, що в процесі твердіння розплаву умови теплообміну за рахунок збільшення товщини металевої кірки змінюються, виконано

дослідження результуючого коефіцієнта теплопередачі кристалізатора $K_{рез}$ за часом. Визначали $K_{рез}$, як середньоарифметичне значення коефіцієнтів K_1, K_2, K_3 , що розраховано для різних напрямів відведення теплоти від розплаву до охолоджувальної води з інтервалом через одну секунду протягом всього часу перебування зливка у виливниці:

K_1 – відведення теплоти через багатошарову стінку «рідкий сплав - тверда кірка - газовий проміжок - виливниця кристалізатора - охолоджувальна вода»;

K_2 – відведення теплоти через багатошарову стінку «рідкий сплав - тверда кірка - газовий проміжок - виливниця кристалізатора - сталеві диски - охолоджувальна вода»;

K_3 – відведення теплоти через багатошарову стінку «рідкий сплав - тверда кірка - газовий проміжок - сталева стрічка - охолоджувальна вода».

Як видно з рис. 3, протягом кристалізації алюмінієвого сплаву значення результуючого коефіцієнта теплопередачі $K_{рез}$ зменшується у часі за експоненціальною залежністю від 593 Вт/(м²·К) до 560 Вт/(м²·К).

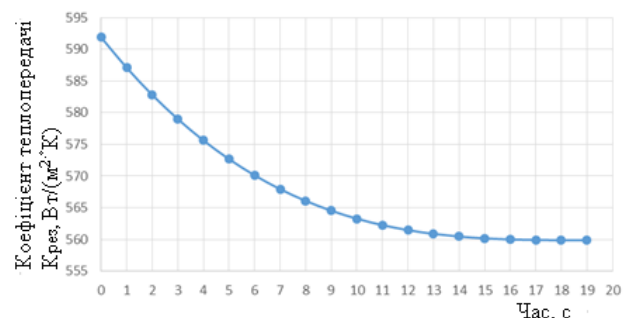


Рисунок 3 – Змінювання коефіцієнта теплопередачі $K_{рез}$ за часом

Висновки. На підставі виконаних досліджень теплообміну в роторній ливарній машині визначено значення приходних і витратних статей теплового балансу. Встановлено, що найбільша втрата теплоти, яка надходить у виливницю, пов'язана з охолодженням кристалізатора водою. Одночасно теплообмін відбувається нерівномірно за різними напрямками від зливка, а відповідно до значень окремих коефіцієнтів теплопередачі: найменший зафіксовано на шляху відведення теплоти через сталеві диски ливарного колеса, а найбільший – з боку сталеві стрічки. При цьому результуючий коефіцієнт теплопередачі кристалізатора зменшується у часі за експонентою. Отримані результати надають можливість визначитися з витратою води на охолодження зливка для забезпечення рівномірного

твердіння металу за поперечним перерізом і до- вжиною.

Бібліографічний перелік

1. **Николаенко, А. Н.** Исследование скорости движения алюминиевой заготовки на литейно-прокатном модуле [Текст] / А. Н. Николаенко, Ю. П. Таран // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*, 2016. – Вип. 1 (35). – С. 68-71.
2. **Pat. USA No 2710433.** Continuous metal casting machine. Apl. IlarioProperzi. Patented 25.02.1949, Published. 14.06.1955.
3. **Far East (China) Group Limited** [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://shcablemachinery.ru/1-4-continuous-casting-rolling-line>. Выборка 25.02.2018.
4. **Southwire Company LLC** [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.southwire.com/documents/-SCR-Aluminum-Brochure.pdf>. Выборка 12.04.2017.
5. **Чуркин, Б. С.** Теория литейных процессов [Текст] / Б. С. Чуркин; учебник / под. ред. Э. Б. Гофмана. – Екатеринбург, 2006. – 454 с.
6. **Альтман, М. Б.** Алюминиевые сплавы: Плавка и литье алюминиевых сплавов [Текст] / М. Б. Альтман, А. Ф. Андреев, Н. Н. Белоусов и др.; отв. ред. В. И. Добаткин. – М. : Металлургия, 1970. – 416 с.
7. **Низомов, З.** Температурная зависимость теплофизических свойств алюминия марки А5 [Текст] / З. Низомов, Ф. М. Мирзоев, М. Б. Акрамов, Р. Х. Саидов // *Доклады академии наук республики Таджикистан*. – 2014. – Т. 57, № 2, – С. 140-144.
8. **Казанцев, Е. И.** Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования [Текст] / Е. И. Казанцев – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.
9. **Линия для непрерывного литья и прокатки алюминия** [Текст]. Техническое описание. Шанхайский научно-исследовательский электротехнический институт. КНР, 2008. – 40 с.
10. **Лукин, С. В.** Исследование теплового баланса криволинейной машины непрерывного литья заготовок [Текст] / С. В. Лукин, А. Н. Кибардин, А. А. Кочкин // *Вестник Череповецкого государственного университета : научный журнал*. – 2015. – Вып. 3. – С. 29-32.
11. **Нащокин, В. В.** Техническая термодинамика и теплопередача [Текст] / В. В. Нащокин Учебное пособие – М. : Высшая школа, 1975. – 496 с.
12. **Родатис, К. Ф.** Котельные установки [Текст] / К. Ф. Родатис; учебное пособие. – М. : Энергия, 1977. – 432 с.
13. **Таранцева, К. Р.** Процессы и аппараты химической технологии в технике защиты окружающей среды [Текст] / К. Р. Таранцева, К. В. Таранцев; учебное пособие. – М. : НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 412 с.
14. **Бухмиров, В. В.** Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи. Методические указания [Текст] / В. В. Бухмиров. – Иваново, 2007. – 39 с.
15. **Емельянов, В. А.** Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок [Текст] / В. А. Емельянов. – М. : Металлургия, 1988. – 143 с.

Николаенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: tetri@ukr.net

Трегулова Ильмира Павловна, магистр кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: admin@zgia.zp.ua

Барищенко Елена Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированного управления технологическими процессами, Запорожская государственная инженерная академия (Украина, Запорожье). E-mail: кафедра_

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В РОТОРНОЙ ЛИТЕЙНОЙ МАШИНЕ

Выполнены исследования теплообмена в роторной литейной машине. Установлено, что для равномерного охлаждения слитка, расход воды, подаваемый с разных сторон кристаллизатора, должен быть согласован с коэффициентами теплопередачи, рассчитанными для соответствующих направлений теплообмена и по длине слитка.

Ключевые слова. теплообмен, литейная машина, кристаллизатор, коэффициент теплопередачи, изложница

Nikolaenko Anatoliy, candidate of technical sciences, Professor of Department of the Automated Control by Technological Processes, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: tetri@ukr.net

Tregulova Il'mira, magister of Department of the Automated Control by Technological Processes, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: admin@zgia.zp.ua

Barishenko Helen, candidate of technical sciences, Associate Professor of Department of the Automated Control by Technological Processes, Zaporizhzhia State Engineering Academy (Ukraine, Zaporizhzhia). E-mail: kafedra_aotp@ukr.net

RESEARCH OF HEAT EXCHANGE IN ROTOR CASTING MACHINE

The heat transfer studies in a rotary casting machine are carried out. It has been established that for uniform ingot cooling, the flow rate of water supplied from different sides of the mold must be matched with heat transfer coefficients calculated for the respective heat exchange directions and along the ingot length.

Keywords: heat transfer, casting mashine, crystallization, heat transfer coefficient, mold

Стаття надійшла до редакції 26.02.2019 р.
Рецензент, проф. М.Ю. Пазюк

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>