

РАСЧЕТ РАЗОГРЕВА СЛИТКА  
ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

При горизонтальном непрерывном литье чугунных полуфабрикатов слиток выходит из кристаллизатора с незатвердевшей сердцевиной и охлаждается на воздухе. При этом вследствие резкого уменьшения интенсивности охлаждения происходит разогрев поверхности слитка, который может привести к проливу жидкого металла за кристаллизатором и нарушению процесса литья. Исследования этого явления проводились, в основном, методами моделирования [1]. В данной работе предложен аналитический вывод времени разогрева и максимальной температуры поверхности корки.

Как известно, при уменьшении интенсивности охлаждения корки увеличивается доля осевой теплопроводности в общем теплосъеме от слитка, поэтому в данной задаче следует учесть и осевую составляющую теплового потока. На рис. 1 показана корка, разрезанная по середине широкой грани.

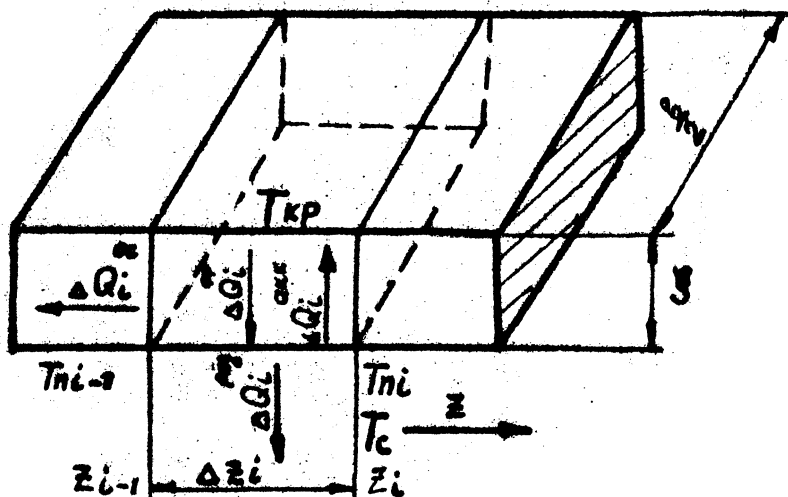


Рис. 1. Схема к расчету разогрева плоского слитка:  
 $\Delta Q_i$  - количество тепла;  $b$  - ширина слитка;  $\xi$  - толщина корки;  $V_L$  - скорость литья;  $z$  - расстояние от кристаллизатора;  $T_{кр}$ ,  $T_n$  и  $T_o$  - температуры внутренней и наружной поверхностей корки и воздуха соответственно

При решении задачи использовались следующие допущения: рациональный теплоперенос в воздухе намного больше конвективного; толщина корки много меньше ее ширины; осевой теплопровод в сторону кристаллизатора намного больше, чем в сторону валков; толщина корки в зоне разогрева постоянна. Распределение температуры в корке задаем параболой степени  $n$  [2]. Для решения используется метод, предложенный в работе [3]. Разбиваем всю зону на  $n$  участков и составляем уравнение теплового баланса для  $i$ -ого участка длиной  $\Delta Z$ .

$$\Delta Q_i^{\text{фр}} = \Delta Q_i^{\text{рад}} + \Delta Q_i^{\text{ос}} + \Delta Q_i^{\text{акк}},$$

$$\Delta Q_i^{\text{рад}} = \frac{C}{10^8} [(T_{\text{п}i}^{\text{ср}})^4 - T_c^4] b \Delta z_i \Delta \zeta_i; \quad (1)$$

$$\Delta Q_i^{\text{ос}} = \frac{\lambda_1}{n+1} \frac{T_{\text{п}(i-1)} - T_{\text{п}(i-2)}}{\Delta z_{i-1}} b \xi \Delta \zeta_i,$$

$$\Delta Q_i^{\text{акк}} = \frac{\delta_1 c_1 \xi}{n+1} (T_{\text{п}i} - T_{\text{п}(i-1)}) b \Delta z_i,$$

$$\Delta Q_i^{\text{фр}} = \frac{n \lambda_i (T_{\text{кр}} - T_{\text{п}i}^{\text{ср}})}{\xi} b \Delta z_i \Delta \zeta_i. \quad (2)$$

Для упрощения расчетов полагаем  $\Delta z_i = \Delta z = \text{const}$ . Выражая из уравнения (1)  $T_{\text{п}i}$  через  $T_{\text{п}(i-1)}$  и используя рекуррентные соотношения, получаем зависимость  $T_{\text{п}i}$  от исходных параметров процесса  $\xi$  и  $T_{\text{п}0}$ .

Из уравнения (1) при  $\Delta Q_i^{\text{акк}} = 0$  определяем длительность стадии разогрева корки плоского слитка  $\zeta_p$  и максимальную температуру поверхности корки  $T_{\text{п}}^{\text{max}}$ .

$$\zeta_p = \frac{\delta_1 c_1 \xi}{n+1} \frac{1}{\frac{n \lambda_1}{\xi} + \frac{4 C T_{\text{п}0}^3}{10^8}}; \quad (3)$$

$$T_{\text{п}}^{\text{max}} = T_{\text{по}} + \frac{1}{1 + \frac{a_1}{V_{\text{л}} \Delta z}} \frac{\frac{n\lambda_1}{\xi} (T_{\text{кр}} - T_{\text{по}}) - \frac{CT_{\text{по}}^4}{10^8}}{\frac{n\lambda_1}{\xi} + \frac{4CT_{\text{по}}^3}{10^8}} \quad (4)$$

Полученное решение справедливо при следующих ограничениях:

$$V_{\text{л}} > \frac{a}{\Delta z_{\text{min}}} ; \quad \xi \ll \frac{n\lambda_1}{\alpha_1} \left[ \frac{\alpha_1 (T_{\text{кр}} - T_{\text{со}})}{C \left( \frac{T_{\text{кр}}}{100} \right)^4} - 1 \right]$$

$$\Delta z_{\text{min}} = \sqrt{\frac{\lambda_1 \xi \epsilon}{(n+1) \frac{n\lambda_1}{\xi} (T_{\text{кр}} - T_{\text{по}} - \frac{CT_{\text{по}}}{10^8})}} \quad (5)$$

где  $a_1$  и  $\lambda_1$  - коэффициенты температуропроводности и теплопроводности корки;  $\alpha_1$  и  $T_{\text{со}}$  - коэффициент теплопередачи от слитка к воде и абсолютная температура воды на выходе слитка из кристаллизатора;  $\epsilon$  - максимальный перепад температур на первом шаге.

Из полученного решения видно, что время разогрева корки не зависит от способа ее разбивки на участки, а осевая теплопередача влияет только на величину подъема температуры поверхности.

На рис. 2 показана зависимость температур разогрева от толщины корки на выходе слитка из кристаллизатора и скорости литья. Для расчета были взяты следующие исходные параметры:  $\rho_1 = 6800 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_1 = 0,16 \text{ ккал/кг}^\circ\text{C}$ ;  $\lambda_1 = 20 \text{ ккал/м}^\circ\text{C}$ ;  $C = 4,8 \text{ ккал/м}^2 \text{ ч К}^4$ ;  $t_{\text{кр}} = 1140^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{со}} = 40^\circ\text{C}$ ;  $t_c = 20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_1 = 500 \text{ ккал/м}^3 \text{ ч}^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 1,1 - 1,06$ ;  $\epsilon = 5^\circ\text{C}$ ;  $\xi_1 = 0,014 \text{ м}$  при  $V_{\text{л1}} = 0,4 \text{ м/мин}$ . Для определения  $\xi$  использовалось соотношение

$$\xi = \xi_1 \sqrt{\frac{V_{\text{л1}}}{V_{\text{л}}}} \quad , \quad \text{а для } T_{\text{по}} -$$

по данному  $\xi$  - формула работы [2].

Поскольку корка слитка находится в напряженном состоянии и с ростом температуры ее прочностные свойства уменьшаются, то при скоростях литья, больших 0,8 м/мин, возможен пролив металла за кристаллизатором. Все температуры на рис. 2 даны в °С. Предельная температура  $t_{\text{пред}}$  определена из урав-

нения (4) при  $V_{\text{л}} \rightarrow \infty$ ,  $\frac{c_1}{V_{\text{л}} \Delta z} \rightarrow 0$ . Можно показать,

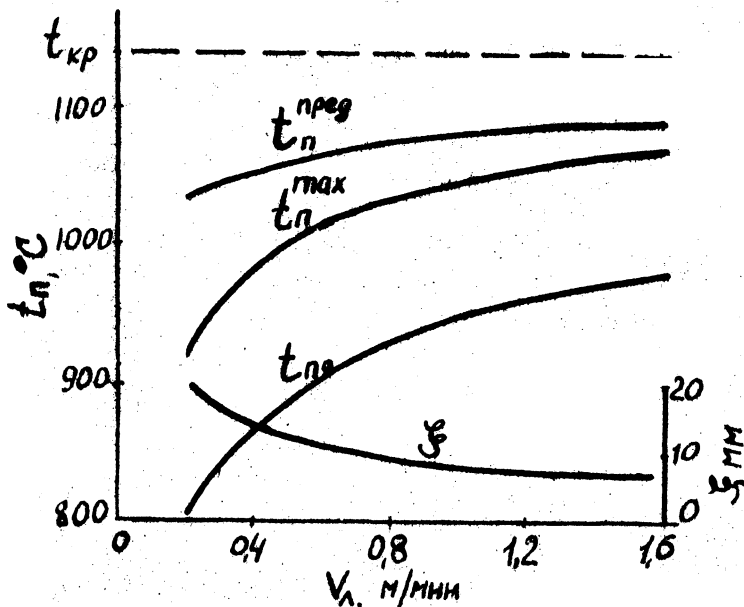


Рис. 2. Зависимость температурного поля слитка от скорости литья

что эта величина получается из решения по методу работы [2] при условии пренебрежения осевым теплоотводом.

#### Л и т е р а т у р а

1. Скворцов А.А., Акименко А.Д. Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки стали. М., 1966.
2. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки. М., 1960.
3. Ваничев А.П. Изв. АН СССР. ОТН, № 12, 1946.