

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ДИАГНОСТИКЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Васильева А.В., Бирюков А.Б.  
Донецкий национальный технический университет

Одним из важнейших элементов, определяющих рациональную работу сталеразливочного комплекса и качество непрерывнолитой заготовки, является кристаллизатор. Применяются кристаллизаторы различного типа для сортовых и слябовых МНЛЗ, однако общая идея работы этого узла состоит в том, что во внутреннюю полость заливается жидкий металл из промежуточного ковша и часть теплоты расплава через металлическую стенку отводится к охлаждающей воде.

В кристаллизаторе происходит придание заготовке определенной формы путем образования твердой корочки по периметру сечения заготовки, которая должна выдержать механическую нагрузку и ферростатическое давление после выхода из кристаллизатора, а так же обеспечить теплоперенос от сердцевины к поверхности при дальнейшем охлаждении.

Тепло от жидкого металла к охлаждающей воде передается через ряд «последовательно включенных» термических сопротивлений: от расплава к образовавшейся твердой корочке → от внутренней поверхности твердой корки к наружной → от твердой корки к гильзе кристаллизатора → от внутренней поверхности гильзы к наружной → от гильзы к охлаждающей воде.

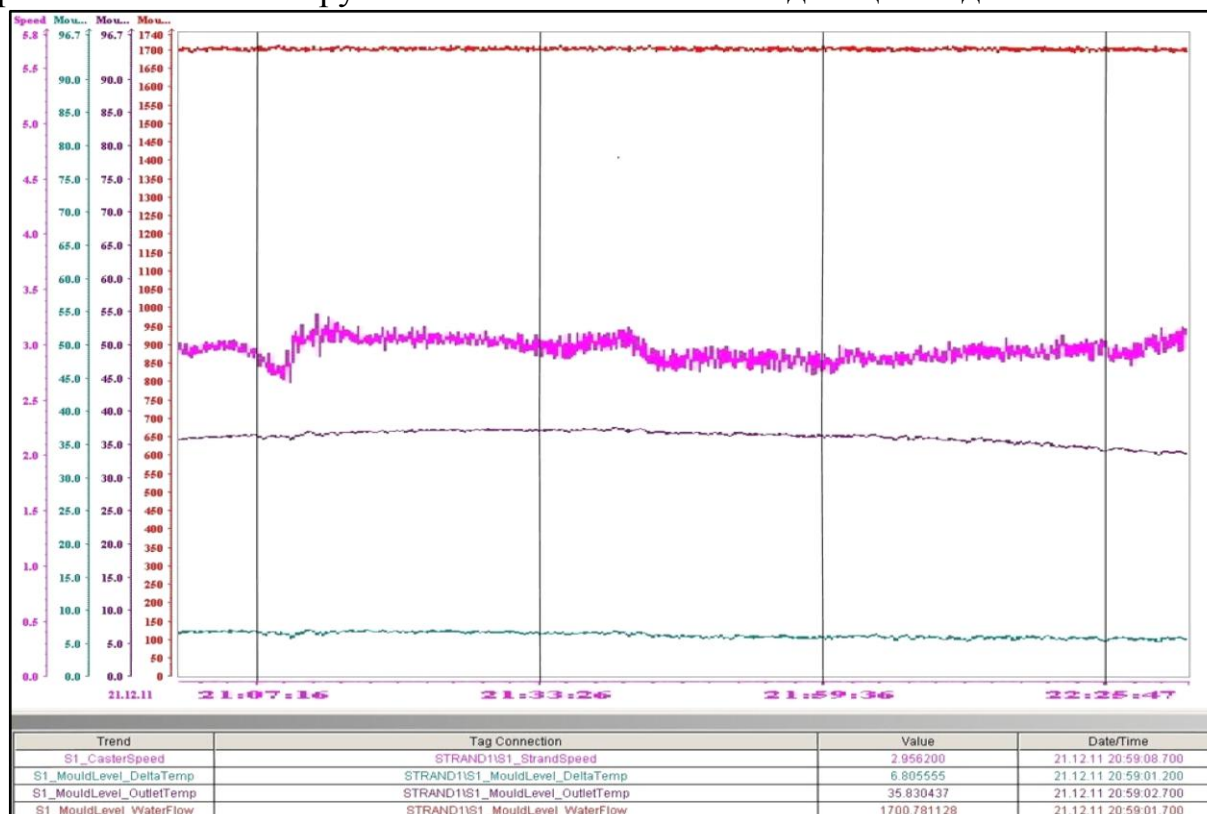


Рисунок 1 – Изменение во времени величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора

Контроль теплоотвода на участке кристаллизатора – существенный момент для осознанного управления процессами, протекающими в кристаллизаторе. Величина отводимого теплового потока и связанные с ним величины позволяют давать оценку процессу охлаждения, его отклонению от нормы (недостаточное, чрезмерное или неравномерное охлаждение). Снижение теплового потока в кристаллизаторе может повлечь за собой подплавление жидким металлом образовавшейся корочки, что чревато ее прорывом на выходе из кристаллизатора.

На практике для контроля теплового потока в кристаллизаторе используется перепад температур охлаждающей воды на входе и на выходе из кристаллизатора. Эта величина характеризует теплообмен между корочкой заготовки и внутренней поверхностью кристаллизатора. Об увеличении количества тепла, отводимого от поверхности заготовки, говорит увеличение перепада температур охлаждающей воды в кристаллизаторе.

Однако различия перепада температур в различные моменты времени могут быть вызваны изменением расхода охлаждающей воды в кристаллизаторе.

Изменение во времени величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора (для условий одного из металлургических предприятий Донбасса), показано на рис. 1. Видно, что для рассматриваемого на тренде временного промежутка расход охлаждающей воды можно принять условно постоянным (1700 л/мин). Для анализа тепловой работы кристаллизатора предложено учитывать величины, более информативные чем перепад температуры охлаждающей воды. В качестве таких величин целесообразно использовать среднюю плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе ( $\bar{q}$ ), среднее значение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе ( $\bar{k}$ ), средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора ( $\bar{\alpha}$ ), эффективную толщину газового зазора ( $\delta_{эф}$ ). Методология определения этих величин, предложенная в работе [1], может быть адаптирована в реальных условиях. Ниже приведен пример расчетного определения усредненных значений названных величин для исходных данных, приведенных на рис.1. Сечение разливаемой заготовки составляет 120x120 мм, а длина кристаллизатора – 750 мм.

Значение средней плотности теплового потока может быть определено из уравнения усредненного теплового баланса кристаллизатора:

$$G \cdot c \cdot \Delta t = \bar{q} \cdot F, \quad (1)$$

где  $G$  - массовый расход воды через кристаллизатор, кг/с;

$c$  - теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

$\Delta t$  - перепад температур охлаждающей воды в кристаллизаторе, °С;

$F$  - поверхность контакта заготовки и кристаллизатора, м<sup>2</sup>.

$$\bar{q} = \frac{G \cdot c \cdot \Delta t}{F} = \frac{1700}{60} \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 6,325}{0,375} = 2007133 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

С точки зрения закона теплопередачи средняя плотность теплового потока может быть выражена как

$$\bar{q} = \bar{k} \cdot (t_s - t_w^{av}), \quad (2)$$

где  $t_s$  - температура солидуса для разливаемой марки стали, °С;

$t_w^{av}$  - средняя температура охлаждающей воды в кристаллизаторе, °С.

Поскольку в качестве движущей силы теплопередачи в выражении (2) взята разница температур от солидуса до средней температуры охлаждающей воды, значение  $\bar{k}$  представляет собой «проводимость» тепловой цепи, включающей в себя термические сопротивления передаче тепла через твердую корку, через газовый зазор, через стенку гильзы кристаллизатора и от ее наружной поверхности к охлаждающей воде [1].

Определив среднюю плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе из уравнения теплового баланса (1), можем найти среднее значение коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе:

$$\bar{k} = \frac{\bar{q}}{(t_s - t_w^{av})} = \frac{2007133}{(1480 - 33)} = 1387,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Используя с некоторым допущением зависимости, справедливые для стационарного теплообмена, можно записать зависимость среднего коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе от всех термических сопротивлений

$$\bar{k} = \frac{\bar{q}}{\frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\bar{\alpha}} + \frac{\bar{\delta}_k}{\lambda_k}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_w$  - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности гильзы кристаллизатора к воде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_m$  - толщина стенки гильзы кристаллизатора, м;

$\lambda_m$  - коэффициент теплопроводности материала гильзы кристаллизатора, Вт/(м·К);

$\bar{\delta}_k$  - средняя толщина корки металла в кристаллизаторе, м;

$\lambda_k$  - коэффициент теплопроводности корки заготовки при ее средней температуре, Вт/(м·К).

При помощи уравнения (3) определяем средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{k}} - \frac{1}{\alpha_w} - \frac{\delta_m}{\lambda_m} - \frac{\bar{\delta}_k}{\lambda_k}} = \frac{1}{\frac{1}{1987,1} - \frac{1}{5000} - \frac{0,01}{360} - \frac{0,007}{34}} = 3487,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (4)$$

Эта величина несет интегральную информацию о тепломеханических процессах, протекающих в кристаллизаторе. Анализ ее значений для кристаллизаторов различной конусности позволит уточнить представления о механизме теплообмена в полости кристаллизатора. Так, зная величину  $\bar{\alpha}$ , можно определить значение эффективной толщины газового зазора между коркой заготовки и внутренней поверхностью гильзы кристаллизатора ( $\delta_{эф}$ ). Поскольку при использовании величины эффективной толщины газового зазора

для изучения теплообмена в кристаллизаторе предполагается, что тепловой поток от поверхности заготовки формируется только по двум механизмам: излучением и теплопроводностью через газовый зазор, получаем следующее выражение для определения  $\delta_{эф}$ :

$$\delta_{эф} = \frac{\lambda_3}{(\bar{\alpha} - \alpha_l)} = \frac{0,09}{(3487,1 - 173,59)} = 2,72 \cdot 10^{-5} \text{ м} \quad (5)$$

где  $\lambda_3$  – теплопроводность газовой прослойки, Вт/(м·К);

$\alpha_l$  – коэффициент лучистой теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора, Вт/(м<sup>2</sup>·К) [1].

Величина  $\alpha_l$  определяется на основании известной зависимости, описывающей лучистый теплообмен:

$$\alpha_l = \frac{C_{пр} \cdot \left[ \left( \frac{T_{п}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]}{T_{п} - T_{ст}} = \frac{3,52 \cdot \left[ \left( \frac{1340}{100} \right)^4 - \left( \frac{763}{100} \right)^4 \right]}{1340 - 763} \quad (6)$$

$$= 173,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

где  $T_{п}$  – температура поверхности заготовки, К;

$T_{ст}$  – температура внутренней поверхности гильзы кристаллизатора, К;

$C_{пр}$  – приведенный коэффициент излучения при лучистом теплообмене между поверхностью заготовки и внутренней поверхностью гильзы кристаллизатора.

Значения  $T_{п}$  и  $T_{ст}$  могут быть с достаточно небольшой погрешностью определены на основании зависимостей, справедливых для стационарной теплопередачи через ряд последовательно включенных термических сопротивлений:

$$T_{п} = t_w^{av} + \bar{q} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{1}{\bar{\alpha}} \right) + 237$$

$$= 33 + 2007133 \cdot \left( \frac{1}{5000} + \frac{0,01}{360} + \frac{1}{3487,1} \right) + 237 = 1340 \text{ К} \quad (7)$$

$$T_{ст} = t_w^{av} + \bar{q} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} \right) + 237 = 33 + 2007133 \cdot \left( \frac{1}{5000} + \frac{0,01}{360} \right) + 237$$

$$= 763 \text{ К}$$

Таким образом численно показано, что на основании предложенных зависимостей (1-7) в рамках системы АСУ ТП в режиме реального времени можно определить изменение значений всех заявленных величин ( $\bar{q}$ ,  $\bar{k}$ ,  $\bar{\alpha}$ ,  $\delta_{эф}$ ) в зависимости от таких аргументов как перепад температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе, расход первичной воды, теплофизические характеристики разливаемой стали, геометрические параметры гильзы кристаллизатора [1].

Литература:

1. Birukov A.B. Billet CC's mould heat engineering parameters monitoring system / A.B. Birukov // Metallurgical and mining industry. – 2014. – №1. – P. 44-48.