

Совершенствование подходов к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе МНЛЗ

А.В. Васильева

*Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР,  
Украина*

*Аннотация: Проанализированы подходы к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе, в основе которых лежит оперативное отслеживание изменения значений таких величин как: средняя плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе, среднее значение коэффициента теплоотдачи в кристаллизаторе, средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора и эффективную толщину газового зазора. Показан пример количественного определения этих величин для устоявшегося режима разлива заготовки сечением 120x120 мм для условий одного из металлургических предприятий Донбасса. Используемые для диагностики величины вычислены по предложенным зависимостям с учетом значений определяющих факторов, полученных из системы АСУ ТП.*

*Ключевые слова: диагностика, теплоотвод, кристаллизатор, сортовая МНЛЗ, перепад температур.*

До 1970-х годов XX века когда заканчивался процесс плавки, сталь выпускали в специальные ковши, а затем разливали в высокие и узкие чугунные формы – изложницы. После застывания стали, изложницы снимали и слитки отправляли на прокатные станы для дальнейшей обработки.

В изложницах сталь застывает неравномерно. Сначала кристаллизуются наружные слои, затем кристаллы прорастают внутрь слитка. Это приводит к образованию усадочной раковины – пустоты в верхней части слитка. Её приходится обрезать перед прокаткой, что влечет за собой наличие отходов до 20% от массы слитка.

Слитки без усадочной раковины можно получать, если сделать слиток бесконечным. Именно эта идея легла в основу создания машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В настоящее время на МНЛЗ разливается примерно треть всей выплавляемой в мире стали.

Помимо повышения выхода годного непрерывная разливка имеет ряд значительных преимуществ перед разливкой в изложницы. Отпавшая необходимость в большом парке сталеразливочных тележек и изложниц, в применении стационарных машин для извлечения слитков из изложниц, установок для охлаждения и подготовки составов с изложницами и пр. сокращает площадь под оборудование до 30-35%, а в некоторых случаях до 50%. Необходимость в строительстве и эксплуатации обжимных цехов устраняется. Всё это способствует снижению уровня капиталовложений и к экономии энергетических и сырьевых ресурсов.

Среди преимуществ также следует отметить повышение качества продукции, улучшение условий труда, улучшение экологической обстановке, а так же возможность автоматизации процесса.

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, а теплота, которая выделяется при охлаждении расплава отводится через металлическую стенку.

В кристаллизаторе происходит придание заготовке определенной формы путем образования твердой корочки по периметру сечения заготовки, которая должна выдержать механическую нагрузку и ферростатическое давление по выходу из кристаллизатора, а так же обеспечить теплоперенос от сердцевины к поверхности при дальнейшем охлаждении [1].

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.

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) [2]. 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 [3].

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

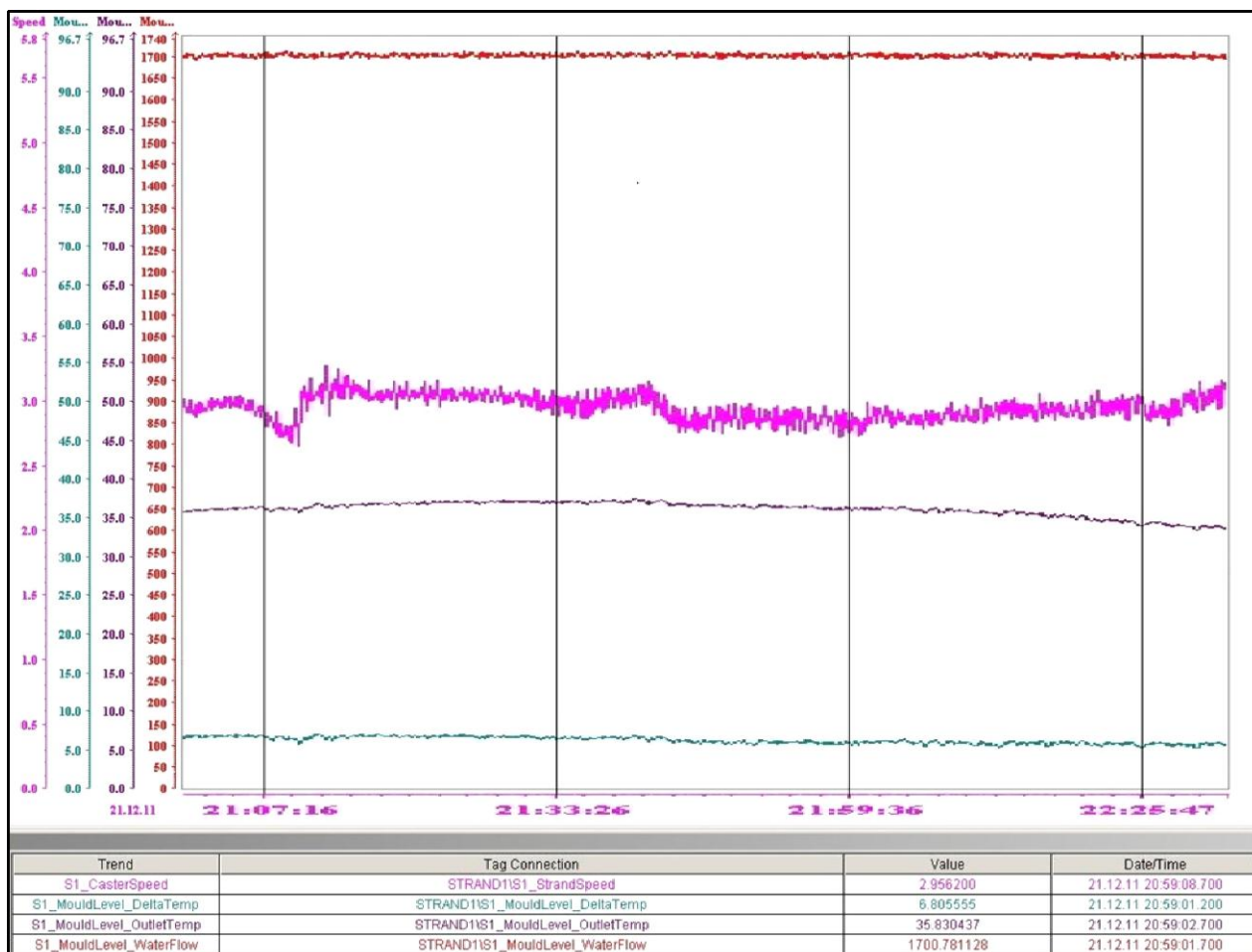


Рисунок 1 – Изменение во времени величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора

Изменение во времени величин, характеризующих тепловую работу кристаллизатора одного из металлургических предприятий Донбасса, показано на рис. 1. Видно, что расход охлаждающей воды можно принять условно постоянным (1700 л/мин). Т.к. имеют место колебания перепада температур, можно сделать вывод, что при анализе тепловой работы кристаллизатора следует учитывать и другие величины, напрямую зависящие от расхода первичной 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 [4], может быть адаптирована в реальных условиях.

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,  $\text{м}^2$ .

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

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,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_w^{av}$  - средняя температура охлаждающей воды в кристаллизаторе,  $^{\circ}\text{C}$ .

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 [4].

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

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

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

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

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

где  $\alpha_w$  - коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности гильзы кристаллизатора к воде,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\delta_m$  - толщина стенки гильзы кристаллизатора,  $\text{м}$ ;

$\lambda_m$  - коэффициент теплопроводности материала гильзы кристаллизатора,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$\delta_k$  - средняя толщина корки металла в кристаллизаторе,  $\text{м}$ ;

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

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

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{\bar{k}} - \frac{1}{\alpha_w} - \frac{\delta_m}{\lambda_m} - \frac{\delta_k}{\lambda_k}}, \quad (4)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{\frac{1}{1987,1} - \frac{1}{5000} - \frac{0,01}{360} - \frac{0,007}{34}} = 3487,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

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  $\delta_{эф}$ :

$$\delta_{эф} = \frac{\lambda_3}{(\bar{\alpha} - \alpha_l)}, \quad (5)$$

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) [4].

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

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

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:

$$T_{п} = t_w^{av} + \bar{q} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_w} + \frac{\delta_M}{\lambda_M} + \frac{1}{\bar{\alpha}} \right) + 237, \quad (7)$$

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

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

$$T_{ст} = 33 + 2007133 \cdot \left( \frac{1}{5000} + \frac{0,01}{360} \right) + 237 = 763 \text{ К}$$

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{3,52 \cdot \left[ \left( \frac{1340}{100} \right)^4 - \left( \frac{763}{100} \right)^4 \right]}{1340 - 763} = 173,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

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

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 ( $\bar{q}$ ,  $\bar{k}$ ,  $\bar{\alpha}$ ,  $\delta_{\text{эф}}$ ) в зависимости от таких аргументов как перепад температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе, расход первичной воды, теплофизические характеристики разливаемой стали, геометрические параметры гильзы кристаллизатора [4].

Выводы:

1. Проанализированы подходы к диагностике тепловых процессов в кристаллизаторе. В качестве величин, на основании которых ведется диагностика предложено выделить: среднюю плотность теплового потока с поверхности заготовки в кристаллизаторе, среднее значение коэффициента теплоотдачи в кристаллизаторе, средний коэффициент теплоотдачи от корки заготовки к внутренней поверхности гильзы кристаллизатора и эффективную толщину газового зазора.

2. Для устоявшихся режимов разливки определены количественные значения предложенных величин. Так, итоговый коэффициент теплопередачи составил  $1387,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ , а эффективная толщина газового зазора  $\delta_{\text{эф}} = 2,72 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ .

#### Библиографический список

1. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали: Учебник /А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан.– Донецк: ДонНТУ, 2011.– 482 с.
2. Бирюков А.Б. Совершенствование теплотехнических параметров систем производства непрерывнолитой заготовки и ее тепловой обработки /А.Б. Бирюков. – Донецк: Изд-во «Ноулидж» (донецкое отделение), 2013. – 471 с.
3. Бирюков А.Б. Современные аспекты теплового мониторинга работы МНЛЗ // Металл и литье Украины. – 2008. – № 7-8. – С. 37-40.
4. Birukov A.B. Billet CC's mould heat engineering parameters monitoring system / A.B. Birukov // Metallurgical and mining industry. – 2014. – №1. – P. 44-48.