

д.т.н. Смирнов А.Н.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина),
Андрощук Р.С., к.т.н. Епишев М.В.
(ООО "ТермоТехно", г. Москва, Россия)
Головчанский А.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШЛАКОВ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

Розглянуто метод визначення теплофізичних властивостей шлаків для безперервного розливання сталі, що полягає в зануренні водоохолоджуваного мідного патрубку в розплав шлаку і фіксації різниці температур вхідної та вихідної води.

Ключові слова: теплопровідність, шлак для кристалізатора, твердіння, безперервне розливання сталі.

Рассмотрен метод определения теплофизических свойств шлаков для непрерывной разливки стали, заключающийся в погружении водоохлаждаемого медного патрубка в расплав шлака и фиксации разности температур входящей и выходящей воды.

Ключевые слова: теплопроводность, шлак кристаллизатора, затвердевание, непрерывная разливка стали, кристаллизатор.

Постановка проблемы. Как известно [1], при непрерывном литье заготовок качество конечного продукта, особенно качество его поверхности, во многом зависит от условий теплопередачи в кристаллизаторе. Этот процесс протекает в несколько стадий:

- передача тепла конвекцией от жидкой стали к затвердевающей корочке слитка;
- передача теплопроводностью через корочку слитка;
- передача теплопроводностью и излучением через слой шлака, которая делится на передачу через слой жидкого, стекловидного и кристаллического шлака;
- передачу тепла преимущественно излучением через воздушный зазор;
- передача теплопроводностью через медную стенку кристаллизатора;
- передача конвекцией от стенки кристаллизатора к охлаждающей воде.

Таким образом, тепловой поток от слитка к кристаллизатору является опре-

деляющим параметром скорости роста корочки слитка.

Механизм затвердевания корочки слитка определяется химическим составом стали и для различных марок он явно отличается [2]. Поэтому, создание соответствующих условий теплопередачи в кристаллизаторе является одной из важнейших задач всего процесса непрерывной разливки стали: величина теплового потока от слитка к кристаллизатору должна быть достаточной для обеспечения необходимой скорости затвердевания слитка, исключая при этом такие негативные явления как растрескивание корочки слитка, являющееся результатом слишком быстрого охлаждения. Повлиять на величину теплового потока в верхней части кристаллизатора (применисковая зона) можно используя различные шлакообразующие смеси с заранее известными теплофизическими свойствами. Поэтому исследование теплофизических свойств ШОС является совершенно необходимым на этапе разработки их составов и перспективным с точ-

ки зрения повышения качества поверхности непрерывнолитых заготовок.

Анализ последних исследований и публикаций. Для оптимизации, в соответствии с условиями разливки, теплового потока в верхней части кристаллизатора необходимо обладать информацией о теплофизических свойствах используемых шлакообразующих смесей и шлаков из них образующихся. Различными исследователями предлагается большое количество разнообразных методик определения этих свойств. Так, авторы работы [3] смоделировали зазор между слитком и кристаллизатором, погружая охлажденный медный блок в слой расплавленного шлака, который располагался на стальной пластине, нагреваемой электрическим током. Теплопередачу через слой шлака измеряли тремя термопарами (две в медном кристаллизаторе и одна в стальной пластине). Данные были получены для нескольких веществ и трех промышленных ШОС. В работе [4] удельная теплопроводность ШОС и полученных из нее образцов шлака была определена методом лазерного импульса, в котором, импульс лазерного луча направляют на одну сторону образца, и непрерывно регистрируют изменение температуры противоположной стороны. Удельную теплопроводность получали из температуропроводности, плотности и удельной теплоемкости, величины которых берут из предыдущих исследований. Авторы работы [5] использовали метод "медного патрубка" для измерения теплофизических свойств толстых пленок шлака. В этом методе, охлажденный медный цилиндр погружали в ванну расплавленного шлака, и измеряли температуры шлака и меди. Для получения значений эффективной теплопроводности использовали переходную модель. В работе [6] использовали метод горячей ленты для измерения удельной теплопроводности, температуропроводности, и удельной теплоемкости ШОС.

Как видно из приведенного краткого литературного обзора наиболее простой, информативной и распространенной мето-

дикой определения таких теплофизических свойств шлаков, как теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость, является метод погружения водоохлаждаемого патрубка.

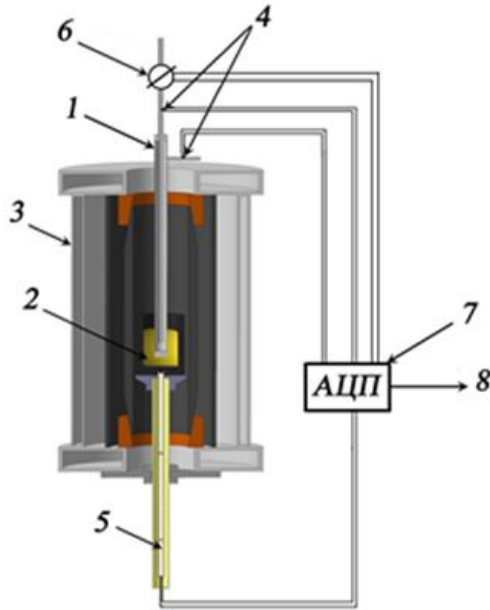
Цель статьи – показать возможность разработки и реализации в условиях отечественной исследовательской лаборатории метода погружения водоохлаждаемого патрубка в шлаковый расплав для определения теплофизических свойств шлаков.

Изложение основного материала. Метод погружения в расплав шлака водоохлаждаемого стального (либо медного) патрубка состоит в следующем.

Водоохлаждаемый патрубок (рисунок 1) представляет собой запаянную конструкцию типа труба в трубе длиной 400 мм. По внутренней трубе (диаметр 8 мм) вода поступает в патрубок, а по наружной (диаметр 14 мм) - выходит из него. По разности температур входящей и выходящей воды определяют теплофизические свойства шлака. На рисунке 2 представлено схематическое изображение экспериментальной установки.



Рисунок 1 – Схематическое изображение водоохлаждаемого патрубка



1 – стальной водоохлаждаемый патрубок;
 2 – тигель с расплавом шлака; 3 – печь Таммана;
 4 и 5 – термопары; 6 – расходомер воды;
 7 – аналого-цифровой преобразователь;
 8 – связь с компьютером

Рисунок 2 – Схематическое изображение метода определения теплофизических характеристик шлаков

При погружении в расплав шлака на поверхности погруженной части патрубка формируется слой замороженного шлака наподобие шлакового гарнисажа на кристаллизаторе при непрерывной разливке стали. При этом через слой шлака проходит поток мощности

$$\frac{Q}{F} = \frac{T_{ж.шл} - T_v}{\frac{d_{шл.тв.}}{\lambda_{шл.тв.}} + \frac{d_{ст}}{\lambda_{ст}} + R_{int} + \frac{1}{\alpha_v}}, \quad (1)$$

где $T_{ж.шл}$ и T_v – температура жидкого шлака и воды в зоне погруженного в шлак патрубка соответственно, К;

$d_{шл.тв.}$ и $d_{ст}$ – толщина слоя замороженного шлака и стальной трубки соответственно, м;

$\lambda_{шл.тв.}$ и $\lambda_{ст}$ – теплопроводность твердого шлака и стали соответственно, Вт/(м·К);

R_{int} – коэффициент межфазного термического сопротивления на границе "кри-

сталлизатор/ шлаковый гарнисаж", (м²·К)/Вт;

α_v – коэффициент теплоотдачи от стенки патрубка к охлаждающей воде (определяют по критериальным зависимостям), Вт/(м²·К).

Поток мощности, получаемый охлаждающей водой

$$\frac{Q}{F} = \frac{C \cdot \Delta M (\Delta T_{шл} + \Delta T_{холост})}{F_{погруж}}, \quad (2)$$

где C – теплоемкость воды Дж/(кг·К);

ΔM – расход воды, кг/с;

$\Delta T_{шл}$ – разность температур воды на входе и на выходе, обусловленная теплопередачей через слой шлака, К;

$\Delta T_{холост}$ – поправочная температура, К;

$F_{погруж}$ – площадь поверхности стальной трубки, погруженной в расплав, м².

В соответствии с законом сохранения энергии приравниваем приходящие (1) и исходящие (2) теплоты и выражаем $\lambda_{шл.тв.}$:

$$\lambda_{шл.тв.} = d_{шл.тв.} \sqrt{\left[\frac{(T_{шл.ж} - T_v) \cdot F_{погруж}}{C \cdot \Delta M (\Delta T_{шл} + \Delta T_{холост})} - \frac{d_{ст}}{\lambda_{ст}} - R_{int} - \frac{1}{\alpha_v} \right]} \quad (3)$$

На основе выражения (3) программным обеспечением производится расчет теплопроводности замороженного шлака. Как видно, для расчета $\lambda_{шл.тв.}$ необходимо знать R_{int} , α_v и $\Delta T_{холост}$. По данным работы [7] коэффициент межфазного термического сопротивления на границе "кристаллизатор/шлаковый гарнисаж" для ШОС, предназначенных для разливки среднеуглеродистых сталей, составляет $(10...12) \cdot 10^{-4}$ (м²·К/Вт), а для ШОС, предназначенных для разливки низкоуглеродистых сталей – $(5...8) \cdot 10^{-4}$ (м²·К/Вт).

Поправочная температура $\Delta T_{холост}$ представляет собой температуру, до которой нагревается вода при прохождении через патрубок, введенный в пустой тигель, размещенный в разогретую до определенной температуры печь. Печь Таммана включают на необходимую мощность, при которой будет проводиться эксперимент, и после прогрева печи и установления стадио-

нарной температуры в печном пространстве, водоохлаждаемый патрубок опускается в печь с пустым тиглем до уровня, на котором впоследствии будет находиться расплавленный шлак. Температура входящей и выходящей воды фиксируется термометрами, расход воды – водометром. Таким образом, учитывается все то количество теплоты, которое получит охлаждающая вода не через слой шлака, а за счет излучения и газовой конвекции.

В следующей, основной части эксперимента, в печь помещают графитовый тигель с определенным количеством исследуемой ШОС, и начинают нагрев. Температура ШОС определяется с помощью введенной в тигель термопары. После расплавления ШОС (определяется визуально) в тигель опускают водоохлаждаемый патрубок и фиксируют изменение температуры воды. Эксперимент продолжают до достижения стационарных условий. Затем патрубок извлекают и производят замер толщины замороженного шлака. После этого, имея все необходимые данные, производят расчет по вышеприведенным уравнениям.

Для более ясного представления влияния структуры и состава шлака на его теплофизические свойства, а также процессы

фазообразования при быстром затвердевании шлака из расплава и его дальнейшем отжиге можно исследовать химический и фазовый состав замороженного шлака.

Таким образом, в целом данный метод позволяет определить теплопроводность твердого шлака, а в сочетании с аналитическими методами более ясно понять влияние состава и структуры шлака на его теплофизические свойства.

Выводы

1. Метод погружения водоохлаждаемого патрубка в расплав шлака позволяет имитировать условия теплопередачи в кристаллизаторе МНЛЗ, а также температурное поле, в котором находится шлаковый гарнисаж в зазоре между корочкой непрерывнолитого слитка и кристаллизатором.

2. В сочетании с методами химического и фазового анализа данный метод позволит получить более ясное представление о влиянии состава и структуры шлака на его теплофизические свойства.

3. Реализованный метод может быть использован при разработке новых и корректировке существующих составов ШОС для непрерывной разливки стали в комплексе с вискозиметрическими данными и данными по интервалу плавления.

Библиографический список

1. Yamauchi A. Heat Transfer between Mold and Strand through Mold Flux Film in Continuous Casting of Steel / A.Yamauchi, K.Sorimachi, T.Sacuraya, T.Fujii // *ISIJ International*.-1993. - Vol.33. - № 1. - P.140-147.
2. Mazumdar S. Solidification control in continuous casting of steel / S. Mazumdar, S.K. Ray // *Sadhana*.- Vol. 26. - Parts 1 & 2. - February – April.- 2001. - P. 179–198.
3. Ohmiya S. Heat Transfer through layers of casting fluxes / S. Ohmiya, K.H. Tacke, K.Schwerdtfeger // *Ironmaking and Steelmaking*.- 1983. - vol. 10. - № 1. - P. 24-30.
4. Susa M. Thermal properties of slag films taken from continuous casting mould / M. Susa, K.C. Mills, M.J.Richardson at al. // *Ironmaking and Steelmaking*. - 1994. - vol. 21.- № 4. - P. 279-286.
5. Mikrovas A.C. Heat transfer characteristics of molten slags / A.C. Mikrovas, S.A. Argyropoulos, I.D. Sommerville // *Ironmaking and Steelmaking*. - 1991. - Vol. 18. - № 3. - P. 169- 181.
6. Susa M. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of slags containing iron oxides / M. Susa, F. Li Nagata // *Ironmaking and Steelmaking*. - 1993. - Vol. 20. -№ 3. - P. 201-206.
7. Cho J. Thermal Resistance at the Interface between Mold Flux Film and Mold for Continuous Casting of Steels / J.Cho, H.Shibata, T.Emi, M.Suzuki // *ISIJ International*. - 1998. - Vol. 38. - №. 5. - P. 440-446.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.