

УДК 669.189:669.046.582

Романюта В.А.<sup>1</sup>, Казачков Е.А.<sup>2</sup>

### ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

*Рассмотрено взаимодействие шлакообразующих смесей с жидким металлом в кристаллизаторе МНЛЗ. Проанализировано поведение шлака в зазоре между кристаллизатором и затвердевающей оболочкой при возвратно-поступательном движении кристаллизатора. Установлена связь между толщиной жидкой пленки шлакового гарнисажа и условиями теплопередачи в кристаллизаторе. Проанализированы различные критерии оптимальности ШОС, применяемой при непрерывной разливке стали.*

Для защиты зеркала металла в кристаллизаторах МНЛЗ с середины 60-х годов применяют шлакообразующие смеси (ШОС) в сочетании с погруженными стаканами для подвода металла под уровень. В процессе непрерывной разливки стали ШОС выполняют следующие основные функции:

- изолируют жидкий металл от воздуха, предотвращая его окисление;
- ассимилируют неметаллические включения, всплывающие в жидком металле;
- теплоизолируют зеркало металла в кристаллизаторе и предохраняют его от чрезмерного охлаждения;
- улучшают условия теплопередачи от непрерывнолитой заготовки к водоохлаждаемым стенкам кристаллизатора;
- выполняют роль смазки между движущейся оболочкой слитка и кристаллизатором.

В результате взаимодействия ШОС с жидкой сталью, на поверхности мениска образуется слой жидкого шлака, частично спекшийся слой и неспеченная порошкообразная ШОС (рис.1).

В процессе непрерывной разливки обеспечивается возвратно-поступательное движение кристаллизатора. В результате этого, жидкий шлак увлекается в зазор между затвердевающей коркой и стенками кристаллизатора. Образующийся смазочный слой уменьшает трение.

Шлаковая прослойка, находящаяся в зазоре между заготовкой и кристаллизатором, выполняет две основные функции: сохранение гомогенной, соответствующим образом смазывающей пленки с подходящей вязкостью, а также обеспечение достаточно интенсивной и равномерной теплопередачи между затвердевающей заготовкой и кристаллизатором. Степень и равномерность теплопередачи от слитка к кристаллизатору через слой шлака оказывает значительное влияние как на рост оболочки слитка, так и на допустимую скорость разливки, а также на качество поверхности слитка и образование трещин.

Современные исследования состояния и характеристик шлаковой прослойки между слитком и кристаллизатором [1—9] показывают, что толщина этой прослойки обычно не превышает 2 мм, и в пределах этой толщины шлак находится одновременно в твердом, размягченном и жидком состоянии.

Толщина слоя шлака, затекающего в зазор между слитком и кристаллизатором, определяется расходом и свойствами ШОС, скоростью вытягивания слитка и тесно связана с механизмом поступления шлакового расплава в зону контакта слитка и кристаллизатора.

<sup>1</sup> ПГТУ, аспирант

<sup>2</sup> ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

Скорость поступления шлакового расплава в зазор между слитком и кристаллизатором связана со скоростью разливки и частотой возвратно-поступательного движения кристаллизатора. В работе Г21 установлено существенное влияние на расход ШОС времени

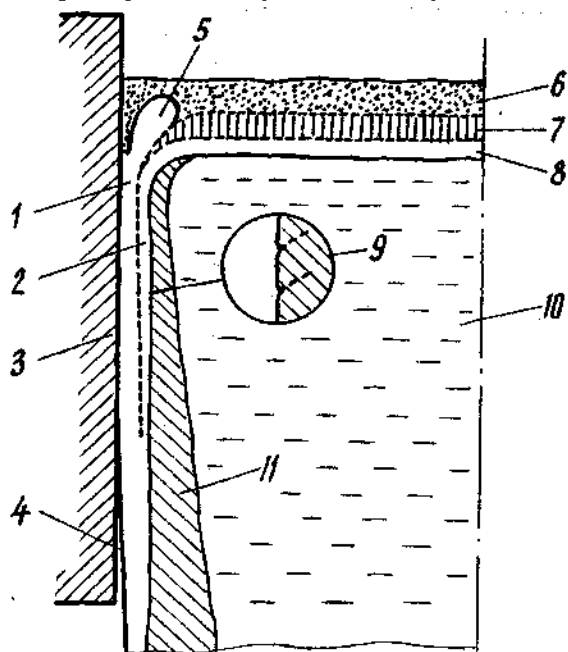


Рис.1 - Схематическое изображение состояния слоев ШОС в кристаллизаторе МНЛЗ  
 I - твердый шлак; 2 - жидкий шлак;  
 3 - медный кристаллизатор; 4 - воздушный зазор; 5 - шлаковый ранг; 6 - порошкообразная ШОС; 7 - спеченная ШОС; 8 - жидкий шлак;  
 9 - следы качания; 10 - жидкая сталь;  
 II - затвердевшая оболочка.

опережения кристаллизатором слитка  $\tau_{on}$ :

$$\tau_{on} = \left( \frac{1}{\pi \cdot f} \right) \cdot \arccos \left( \frac{V}{\pi \cdot A \cdot f} \right), \quad (1)$$

где  $f$  - частота качания кристаллизатора, мин<sup>-1</sup>;

$V$  - скорость вытягивания слитка, м/мин;

$A$  - амплитуда качания кристаллизатора, м.

Увеличение частоты возвратно-поступательного движения кристаллизатора и скорости разливки приводит к уменьшению времени опережения, а увеличение хода кристаллизатора к его увеличению. На основе обобщения экспериментальных данных в работе [2] получена эмпирическая зависимость между временем опережения и удельным расходом ШОС:

$$Q_y = -0.005 + 2.021 \cdot \tau_{on}, \quad (2)$$

где  $Q_y$  - удельный расход ШОС, кг/т;

$\tau_{on}$  - время опережения, с.

Формула (2) справедлива для интервала значений  $\tau_{on}$  (с):

$$0.2с < \tau_{on} < 0.6с$$

Для определенных параметров возвратно-поступательного движения кристаллизатора, расход ШОС определяется условиями поступления жидкого шлака в зазор между стенками кристаллизатора и затвердевающей оболочкой слитка и зависит от вязкости шлака ( $\eta$ ) и скорости вытягивания заготовки ( $V$ ). Эти параметры определяют как толщину жидкой пленки шлакового гарнисажа ( $\delta$ ), так и условия теплопередачи от оболочки слитка к кристаллизатору: изменение температуры на поверхности кристаллизатора ( $\Delta T$ ) и тепловой поток от слитка к кристаллизатору ( $q$ ). Как показывают прямые измерения [10,11], при определенных значениях произведения  $\eta \cdot V$ , величины  $\Delta T$ ,  $q$  и  $\delta$  имеют минимальные значения (рис.2).

Этот экстремум определяет оптимальное значение произведения  $\eta \cdot V$  для соответствующих условий непрерывной разливки. Соответственно, оптимальная вязкость ШОС изменяется в зависимости от скорости разливки.

Шлаковая прослойка между слитком и кристаллизатором, в связи с очень большим градиентом температуры по ее толщине, находится частично в жидком и частично в твердом состоянии. Прилегающая к слитку сторона шлаковой прослойки, в верхней части

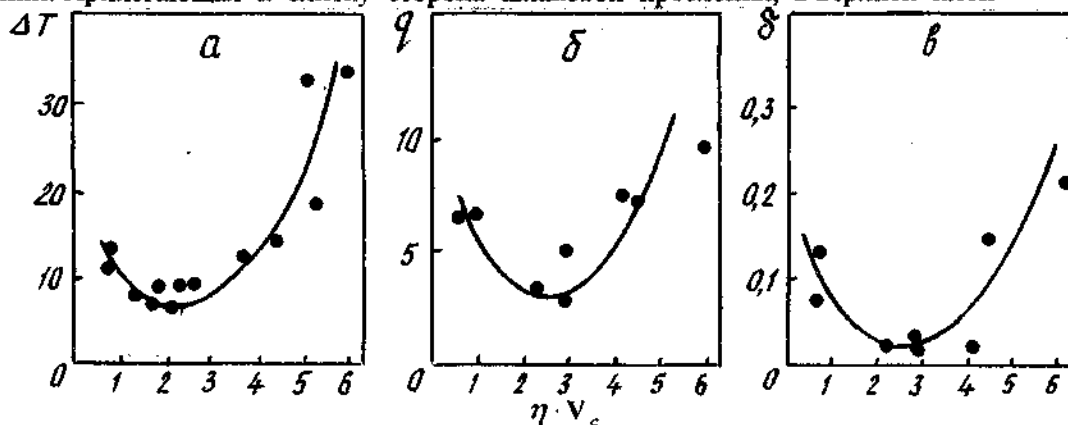


Рис.2 - Зависимость между произведением  $\eta \cdot V_c$  (пуаз · м /мин) и (а) изменением температуры в кристаллизаторе,  $\Delta T$  ( $^{\circ}C$ /мин), (б) тепловым потоком в кристаллизаторе,  $q$  (Мкал/м<sup>2</sup> · ч) и (в) толщиной жидкой пленки шлака,  $\delta$  (мм).

кристаллизатора находится в жидком состоянии, т.к. ее температура выше температуры плавления ШОС. В то же время прилегающая к стенке кристаллизатора сторона шлаковой прослойки находится в твердом состоянии в связи с резким охлаждающим эффектом медной водоохлаждаемой стенки. Наличие жидкой прослойки шлака обеспечивает «жидкостное» трение и соответственно небольшие усилия вытягивания слитка из кристаллизатора, не приводящие к образованию трещин и разрывов в затвердевающей оболочке. Охлаждение поверхности слитка до температур ниже температуры затвердевания шлака или нарушение шлаковой прослойки и прямой контакт поверхности слитка с медной стенкой кристаллизатора, приводят к возникновению «сухого» трения, значительным усилиям вытягивания и образованию трещин в затвердевающей оболочке. Поэтому представляет особый интерес оценить толщину жидкой прослойки шлакового гарнисажа в различных участках кристаллизатора.

В работе [1] задача определения толщины жидкой прослойки шлакового гарнисажа решалась на основе экспериментального определения теплового потока от слитка к кристаллизатору на различных уровнях по высоте кристаллизатора.

Результаты расчетов показали, что для скорости вытягивания 0,4 - 1,1 м /мин, среднеинтегральное значение толщины шлаковой прослойки по высоте кристаллизатора составляет 0,400-0,470 мм. При этом среднеинтегральное значение толщины жидкой составляющей в 4-5 раз меньше, чем твердой, и равняется примерно 100 мкм. С увеличением скорости вытягивания толщина шлаковой прослойки уменьшается.

В работе [5] было установлено, что на образование жидкой прослойки расходуется около 25 % общего количества добавляемой ШОС.

Для оценки толщины жидкой шлаковой пленки в слое шлака между затвердевающей оболочкой и кристаллизатором в работе [9] предложена следующая схема. Предполагается, что температура жидкой шлаковой пленки в контакте с поверхностью затвердевающей оболочки равна температуре поверхности оболочки. Температура твердой пленки шлака в контакте со стенкой кристаллизатора ( $T_2$ ) рассчитывается по уравнению:

$$T_2 = T_{Cu} + 500, \quad (3)$$

где  $T_{Cu}$  - температура поверхности медной водоохлаждаемой стенки кристаллизатора.

Толщина пленки жидкого шлака рассчитывается по уравнению (4), используя значение температуры плавления ШОС ( $T_p$ ):

$$\delta, - [fc - T_p] / (\rho \cdot T_p) \quad (4)$$

где  $T_1$  - температура внутренней поверхности пленки шлака (°C);

$T_2$  - температура наружной поверхности пленки шлака (°C).

При увеличении скорости разливки, температура оболочки слитка в кристаллизаторе возрастает. Это приводит к повышению температуры в прилегающих к ней слоях гарнисажа, снижению вязкости жидкой части шлаковой прослойки и соответственно к увеличению протяженности области “жидкостного трения”. Однако при этом снижается удельный расход ШОС и уменьшается толщина смазывающей пленки. Поэтому глубина ее проникновения определяется скоростью разливки и физическими свойствами шлака.

Исходя из изложенного выше, для каждой скорости разливки существует оптимальная ШОС с характерными значениями вязкости и температуры плавления, при которых область “жидкостного” трения будет наибольшей. Применение такой оптимальной ШОС обеспечивает наиболее высокое качество поверхности непрерывнолитой заготовки. Правильность высказанных предположений подтверждает существование экстремума для зависимости теплового потока от слитка к кристаллизатору ( $q$ ), от произведения вязкости разливочного шлака ( $\eta$ ) на скорость вытягивания заготовки ( $V$ ). Обработкой экспериментальных данных работы [9] получено уравнение регрессии:

$$q = 9,590 - 5,313 \cdot (\eta \cdot V) + 1,038 \cdot (\eta \cdot V)^2, \quad (5)$$

где  $q$  - тепловой поток, Мкал/м<sup>2</sup>, час,

$\eta$  - вязкость разливочного шлака при 1300 °C, пуаз,

$V$  - скорость вытягивания заготовки, м/мин.

Минимальное значение теплового потока соответствует произведению  $\eta \cdot V = 2,56$

Исходя из этого значения следует выбирать ШОС с соответствующей вязкостью для заданной скорости разливки.

В качестве критериев оптимальности ШОС могут привлекаться и другие характеристики. Так, по данным [12], одним из критериев оптимальности химического состава ШОС может служить глубина следов качания на слитке. При слишком низкой вязкости образующегося при плавлении ШОС шлака, на поверхности сляба отмечаются резкие следы качания глубиной более 3мм и появляются поперечные трещины. Шлак, имеющий низкую температуру плавления и малую вязкость, не застывает в кристаллизаторе и частично вытекает из него.

Оптимальными характеристиками ШОС можно считать такие, которые обеспечивают при отливке заготовок спокойных и низколегированных сталей следы качания глубиной 0,8-1,5мм. Уменьшение или увеличение глубины следов качания свидетельствует об отклонении вязкости шлака от оптимальной для данных условий непрерывной разливки и требует соответствующей корректировки состава ШОС.

Еще одним критерием оптимальности состава и характеристик ШОС может служить толщина жидкого слоя шлака на зеркале металла в кристаллизаторе, которая зависит от ряда факторов (скорость плавления ШОС, скорость разливки, расход ШОС, состав ШОС и др.).

Для предотвращения возможности появления шлаковых включений на поверхности непрерывнолитых слябов, необходимо чтобы толщина слоя жидкого шлака на мениске металла была сравнима с ходом кристаллизатора (шаг качания).

Основное влияние на толщину жидкого слоя шлака оказывает вид и количество добавляемого в ШОС углеродсодержащего вещества, которое определяет скорость плавления ШОС [12, 13].

По опыту ряда японских заводов [14] оптимальная толщина жидкого слоя ШОС на зеркале металла, определяется соотношением:

$$d=0,02 \cdot S_R / a \cdot b \cdot v \cdot w, \quad (6)$$

где  $S_R$  - скорость плавления ШОС;  
 $a$  и  $b$  - размеры кристаллизатора (м);  
 $v$  - скорость разливки, м/мин;  
 $w$  - расход ШОС (кг/т).

Оптимальная толщина жидкого слоя шлака на мениске составляет для слябовых МНЛЗ  $d = 5 - 10$  мм.

#### Выводы

1. Эффективный теплоотвод от затвердевающего слитка к кристаллизатору через слой твердо-жидкого шлакового гарнисажа обеспечивается при оптимальном сочетании вязкости шлака и скорости разливки. С увеличением скорости вытягивания заготовки необходимо использовать ШОС с меньшей вязкостью.

2. Толщина жидкого слоя шлака на зеркале металла в кристаллизаторе должна быть достаточной для обеспечения беспрепятственного проникновения шлака в зазор между слитком и кристаллизатором и обеспечения смазки в кристаллизаторе с преобладанием «жидкостного» трения.

3. Толщина слоя расплавленной ШОС на зеркале металла в кристаллизаторе увеличивается с ростом скорости плавления ШОС и уменьшается при увеличении скорости разливки и увеличении сечения кристаллизатора.

#### Перечень ссылок

1. Исследование зоны контакта слитка и стенки кристаллизатора / В.И. Паршин, В.И. Дождиков, В.Е. Бережанский, И.И. Шейнфельд // *Сталь*, - 1987, - N 9. - С.26 -28.
2. Исследование механизма поступления шлакового расплава в зону контакта между оболочкой слитка и стенками кристаллизатора / Д.П. Евтеев, И.И. Шейнфельд, Б.Г. Кузнецов и др. // *Сталь*, - 1985, - N4. - С.19-21.
3. Оптимизация процесса непрерывной разливки стали путем улучшения теплопередачи в кристаллизаторе / А.М. Пожелванов, В.И. Дождиков, В.М. Кукарцев и др. // *Сталь*, - 1986, - N7. - С.20-22.
4. Schell R., Körte W. Effect of different flux powder composition on continuous casting slags and casting // *Metallurgical Plant and Technology* - 1987, -V. 10, -N6. -P.22-32.
5. Улучшение поверхности непрерывнолитого слитка путем оптимизации свойств шлакообразующей смеси / В.М. Паршин, И.И. Шейнфельд, В.М. Кукарцев и др. // *Сталь*, - 1986, -N7. -С.22-24.
6. Исследование влияния режимов возвратно-поступательного движения кристаллизатора на качество поверхности непрерывнолитых слитков / В.И. Уманец, Е.И. Ермолаева, С.А. Крулевецкий и др. // *Непрерывная разливка стали*, МЧМ СССР. - М., - 1974, - N2. -С. 79-85.
7. Gray R., Marston H. The influence of mould fluxes on casting operation and surface quality // *Proc. 62-nd Nat. OH and BOS conf.* - 1979. - V.62. -P.93-102.
8. Riboud P. V., Larrecy M. Lubrication and Heat transfer in a Continuous Casting Mold // *Steelmaking Proceedings ISS-AIME*. -1979. -V.62, March. -P.78-92.
9. Development of a New Mold Oscillation Mode for High-speed Continuous Casting of Steel Slabs / M. Suziuki, H. Murikami, T. Kitagavaat. Et al. // *ISIJ International*. - 1991, -V.31, N 3. -P.254-261.
10. Mold Powder Technology for Continuous Casting of Aluminum-Killed Steel / Nacano T., Kishi T., Kogama K. et al. // *Transactions of ISIJ*, -1984. -V.24, -P.950-956.

11. Mold Powder Technology for Continuous Casting of Low-Carbon Aluminum-Killed Steel / *Ogibayashi S., Mukai T., Mimura Y., et al.*//Nippon Steel Technical Report.-1987.-N34.-P. 1-10.
- 12.0 критериях выбора компонентного состава гранулированной шлакообразующей смеси для кристаллизатора УНРС / *В.В.Гречишный, С.К.Носов, А.Ф.Сарычев и др.*// Труды III конгресса сталеплавильщиков.-М. :Черметинформация.-1996.-С.352-354.
- 13.Model Analysis of Melting Process of Mold Powder for Continous Casting of Steel *IT.Nakano, K.Nagano, N.Masuo et al.*//Nippon Steel Technical Repott.-1987.-N 34.July.-P.21-30.
- 14.Dezign for Cemical and Physical Properties of Continuos Casting Powders *IK.Koyama, K.Nogano, Y.Nagano et al.*//Nippon Steel Technical Report.-1987.-N34, July.-P.41-47.

Романюта Виктория Александровна. Аспирант кафедры «Теория металлургических процессов», окончила ПГТУ в 1993 году. Основное направление научно-исследовательской работы - совершенствование физико-химических характеристик шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали.

Казачков Евгений Александрович. Д-р техн. наук, профессор. Заслуженный деятель науки Украины, зав кафедрой «Теория металлургических процессов» Приазовского государственного технического университета. Окончил в 1949 году Московский институт стали и сплавов. Основные направления научных исследований - физико-химические и теплофизические основы новых перспективных процессов выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки Стали.