

**Куберский С. В.**  
*к.т.н., профессор,*  
**Проценко М. Ю.**  
*к.т.н., доцент,*  
**Красюк Д. В.**  
*магистрант,*  
**Павлов А. В.**  
*магистрант*

*Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, ЛНР*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ШЛАКООБРАЗУЮЩЕЙ СМЕСИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ**

Одним из основных условий формирования качественного непрерывнолитого слитка, является работа шлакообразующей смеси (ШОС) на мениске жидкой стали и в зазоре между формирующейся заготовкой и рабочей стенкой кристаллизатора. Используемые в кристаллизаторе ШОС обеспечивают смазку контактирующих поверхностей и позволяют регулировать теплоотвод на участке жидкая сталь — корка слитка — ШОС — стенка кристаллизатора — охлаждающая вода. Использование ШОС либо жидких смазок позволило значительно уменьшить количество подвисаний заготовок в кристаллизаторе, а, следовательно, и вероятность образования прорывов. Большинство прорывов, не связанных с прямым нарушением технологии и состоянием оборудования МНЛЗ, относятся к так называемым «шлаковым» прорывам [1]. В процессе непрерывной разливки в зазор между формирующейся стальной корочкой и стенками кристаллизатора, благодаря вертикальным его качаниям, вовлекается расплавленный шлак, обеспечивающий смазку и препятствующий прилипанию корочки к стенкам кристаллизатора. Тем не менее, в существующей практике непрерывной разливки, подвисания имеют место и могут возникать в случае недостаточной или неравномерной смазки ШОС рабочей поверхности медных стенок кристаллизатора (неправильно подобрана или не качественная ШОС), попадания неметаллических включений между стенками кристаллизатора и поверхностью непрерывнолитой заготовки, увеличения зазора между стенками и корочкой более допустимых значений и других технологических факторов [2].

Равномерность затекания смазки может нарушаться при повышенной вязкости жидкого шлака, большом количестве неметаллических включений (НВ), попадающих в кристаллизатор из промежуточного ковша и оказывающих влияние на состав и свойства жидкой ШОС, недостаточном слое жидкого шлака. По данным работ [3, 4], требуемые значения глубины ванны жидкого слоя ШОС для условий разливки со скоростью примерно до 1 м/мин составляют 7–10 мм, а для высокоскоростных МНЛЗ — 15–20 мм, оптимальная толщина жидкого слоя шлака в зазоре для сортовой заготовки должна быть 0,04–0,05 мм, круга 0,08–0,10 мм, блюма 0,08–0,15 мм, сляба 0,15–0,23 мм.

Основными причинами попадания в расплав НВ являются вторичное окисление, захват шлака при технологических переливах, перемешивание металла и шлака, а также разрушение футеровки. Размер таких НВ составляет от 3–5 до нескольких десятков микрометров. Поэтому, эти включения могут негативно влиять на свойства ШОС и попадать вместе с ШОС в зазор между стенками кристаллизатора и поверхностью непрерывнолитой заготовки, способствуя образованию дефектов [5].

Для обеспечения безаварийного режима непрерывной разливки и получения качественного металла ШОС должна обладать определенным, соответствующим условиям разливки, уровнем технологических свойств (скорость и температурный интервал плавления, вязкость, температура затвердевания, поверхностное натяжения, смачивание и др.) которые обеспечиваются соответствующим ее химическим составом.

Поэтому основной задачей данной работы была разработка методики для исследования поведения жидкой ШОС и НВ в зазоре между стенкой кристаллизатора и корочкой непрерывнолитого слитка в зависимости от их свойств и в первую очередь вязкости и смачивания.

Для проведения исследований была предложена физическая модель (рис. 1), имитирующая зазор между стенкой кристаллизатора и корочкой непрерывнолитого слитка. Модель представляет собой 2 стекла (150×150 мм) соединенных между собой зажимами и закрепленных вертикально в штативе. Для образования зазора по краям стекол в вертикальной плоскости укладываются полоски полиэтилена шириной 10 мм. Необходимая толщина зазора обеспечивается укладкой различного количества полосок, изменялась в пределах 0,05–0,50 мм и контролировалась с помощью измерительного щупа. Таким образом, обеспечивалось геометрическое подобие толщины зазора на модели и в реальных условиях непрерывной разливки на слябовых МНЛЗ изменяющейся от 0,1 до 0,5 мм в зависимости от скорости разливки и параметров качания кристаллизатора [6].

Следующим этапом исследований был подбор модельной жидкости для исследования поведения жидкой ШОС и НВ в зазоре. С этой целью было определено влияние температуры на вязкость различных ШОС, применяемых в условиях действующего производства и относительно доступных масел, которые предполагалось использовать для физического моделирования (рис. 2).

Вязкость определяли по методике, описанной в работе [7] с использованием электроротационного вискозиметра с точностью измерения 5–7 % и с воспроизводимостью результатов в диапазоне измеряемых величин вязкости от 0,01 до 10 Па·с.

Представленные на рисунке 2 данные свидетельствуют о том, что вязкость силиконового и машинного масел в температурном диапазоне 12–37 °С очень близка к вязкости ШОС при температурах 1200–1400 °С. Поэтому данные масла могут быть использованы для физического моделирования исследуемых процессов. Для изучения поведения НВ в зазоре между стенками кристаллизатора и корочкой НЛЗ в качестве НВ можно использовать касторовое масло, так как оно по своей вязкости ближе к вязкости НВ, чем к вязкости исследованных масел и ШОС.

Смачивание контактирующих поверхностей силиконовым, машинным и касторовым маслом можно оценивать по величине краевого угла смачивания.



Рисунок 1 — Физическая модель для исследования поведения ШОС и НВ в зазоре

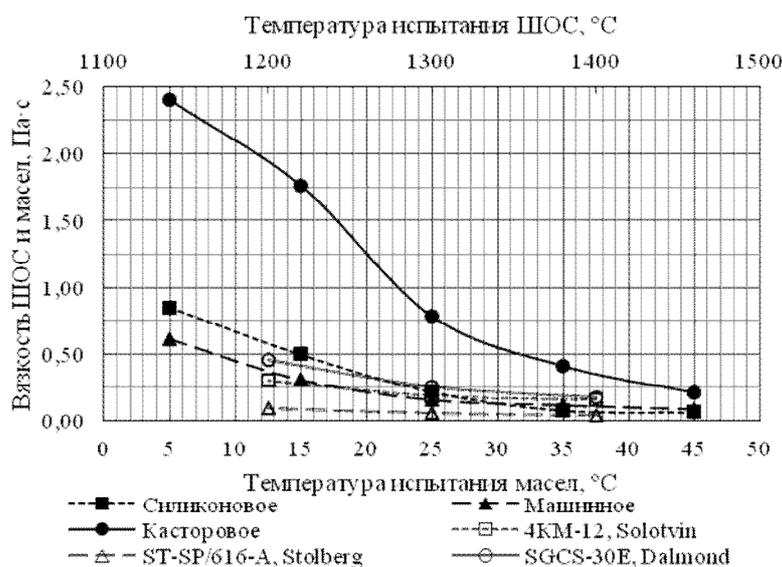


Рисунок 2 — Вязкость ШОС и масел при различной температуре

На основании представленных данных и изготовленной физической модели была предложена методика исследований поведения ШОС и НВ в зазоре между стенкой кристаллизатора и корочкой непрерывнолитого слитка заключающаяся в следующем:

- обезжиривается внутренняя часть стеклянных пластин, укладываются полоски полиэтилена для обеспечения необходимого зазора и стекла скрепляются зажимами;
- подготовленную модель размещают в штативе и выравнивают с помощью уровня в горизонтальном положении;
- под модель устанавливается мерная емкость для сбора масла после его истечения через зазор;
- в зазор модели подается масло, имеющее определенную температуру (вязкость);
- в процессе эксперимента визуально и с помощью видео камеры фиксируется время движения масла в зазоре и наполнения мерной емкости;
- уровень масла в ванне модели необходимо поддерживать постоянным, для имитации поведения жидкого шлака на мениске металла в кристаллизаторе.

Аналогичная последовательность действий может быть использована и при проведении экспериментов по исследованию поведения НВ в ШОС. Основное отличие состоит в том, что после равномерного заполнения зазора силиконовым или машинным маслом, в него с помощью шприца вводится капля касторового масла и фиксируется, время ее перемещения.

По результатам экспериментов определяется линейная скорость движения масла в зазоре, обусловленная преобладающими капиллярными силами  $V_{\text{кап}}$  т. е. время, за которое масло движется от верха до низа модели. Такой механизм характерен нормальному режиму работы ШОС в зазоре с непрерывной подпиткой новыми порциями и неразрывным фронтом ее перемещения в зазоре. Кроме того, необходимо определять скорость полного заполнения зазора физической модели исследуемым маслом  $V_{\text{расх}}$  по объемному расходу масла, истекающего с нижнего среза модели в приемную мерную емкость за определенный промежуток времени и пересчитывать на линейную скорость движения жидкости в зазоре. Этот механизм имеет место в случае нарушения или прекращения подачи ШОС в зазор, т. е. при разрушении целостности фронта движущейся пленки жидкой смеси.

Отношение этих скоростей  $K = V_{\text{расх}}/V_{\text{кап}}$  позволяет оценить поведение жидкости в зазоре в случае нарушения или прекращения затекания в него жидкой ШОС т. е. определить преобладание одной скорости над другой.

Для сокращения количества опытов по определению поведения ШОС при различной величине зазора и температуре модельной жидкости целесообразно использовать метод

двухфакторного планированного эксперимента с двумя звездными точками для диапазона зазоров 0,05–0,5 мм и температуры 5–45 °С.

По результатам экспериментов строятся зависимости скоростей движения масел в зазоре от его величины и их вязкости, а также определяются краевые углы смачивания различных подложек используемыми маслами.

Полученные зависимости позволят прогнозировать расход ШОС в зависимости от ее вязкости и величины зазора.

### Список литературы

1. Вдовин, К. Н. Рафинирование металла в промежуточном ковше МНЛЗ : монография / К. Н. Вдовин, М. В. Семенов, В. В. Точилкин. — Магнитогорск, 2006. — 120 с.
2. Смирнов, А. Н. Анализ поведения ШОС в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ и её влияние на образование прорывов / А. Н. Смирнов, Е. Н. Максаев, С. В. Куберский // Сбор. науч. трудов. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — Вып. № 38. — С. 112–122.
3. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — 482 с.
4. Stone, D. T. Measurement and modeling of heat transfer across interfacial mold flux layers / D. T. Stone, B. G. Thomas. — Canadian Metallurgical Quarterly, 1999. — P. 301–375.
5. Лейтес, А. В. Защита стали в процессе непрерывной разливки / А. В. Лейтес. — М. : Металлургия, 1984. — 320 с.
6. Milone, M. K. Industrial development of Master-Cast system for real time prediction of stainless slab surface quality / M. K. Milone, G. T. Spacoratella. — М. : Conf. on continuous casting, 1998. — P. 831–842.
7. Смирнов, А. Н. Повышение стойкости футеровки сталеразливочных ковшей : монография / А. Н. Смирнов, Г. Г. Немсадзе, С. В. Куберский. — Днепр : ООО « Гир-Интернешнл », 2017. — 205 с.