

УДК 621.746

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ШЛАКОВОГО ГАРНИСАЖА НА СТЕНКЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

*Габеля Д.И., к.т.н., доцент кафедры металлургии, машиностроения
и технологического оборудования*

*Кабаков З.К., д.т.н., профессор кафедры металлургии, машиностроения
и технологического оборудования*

Грибкова Ю.В., к.т.н., доцент кафедры математики и информатики (150475@mail.ru)

Череповецкий государственный университет
(162600, Россия, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

Аннотация. Процессы формирования гарнисажа и жидкой пленки между кристаллизатором и поверхностью заготовки оказывают влияние на показатели качества и стабильность непрерывной разливки стали. Известен ряд теоретических исследований, посвященных прогнозу толщины гарнисажа и пленки жидкого шлака. Однако в этих исследованиях не учитывается взаимное влияние процессов формирования гарнисажа и пленки, а также формирования толщины оболочки заготовки. В связи с этим в работе представлена разработанная авторами математическая модель взаимосвязанных тепловых процессов в системе слоев «медная стенка кристаллизатора – гарнисаж – пленка жидкого шлака – корка слитка». Модель позволяет прогнозировать динамику формирования толщины корки слитка, шлакового гарнисажа и слоя жидкого шлака по высоте кристаллизатора и длину участка жидкостного трения в кристаллизаторе в зависимости от скорости литья, температуры разливаемой стали и плавления шлака, толщины слэба и рабочего слоя медной стенки. Установлена адекватность модели объекту по таким параметрам, как температура поверхности заготовки, толщина корки, удельный тепловой поток в кристаллизаторе и температура рабочей стенки. Показан пример применения разработанной модели, в котором исследовано влияние скорости разливки на длину участка жидкостного трения в кристаллизаторе. Установлено, что при скоростях 0,8; 1,0 и 1,2 м/мин шлаковая прослойка сохраняется на протяжении 0,331; 0,415 и 0,498 м от мениска металла соответственно. При этом толщина гарнисажа достигает максимального значения 0,77 мм. Дальнейшее формирование заготовки происходит в условиях отсутствия смазки в кристаллизаторе. Указана возможность использования разработанной модели технологами при выборе химического состава шлакообразующей смеси, обеспечивающего требуемую длину участка жидкого шлака, и конструкторами при выборе профиля кристаллизатора с учетом толщины гарнисажа, а также в учебных целях.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, кристаллизатор, теплообмен, шлакообразующая смесь, гарнисаж, математическая модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-63-68

Шлакообразующие смеси (ШОС) для кристаллизаторов МНЛЗ защищают металл от вторичного окисления, уменьшают потери теплоты с мениска металла и от корки к кристаллизатору, а, главное, играют роль смазки между коркой и кристаллизатором. Шлакообразующая смесь подается небольшими порциями на поверхность металла в кристаллизаторе, где она расплавляется и на мениске металла появляется слой шлака, на котором находится слой ШОС.

В процессе разливки шлак, образующийся на мениске металла, затекает между коркой металла и стенкой кристаллизатора. Часть шлака затвердевает на стенке кристаллизатора. Другая, жидкая часть, увлекается вниз коркой вытягиваемой заготовки до тех пор, пока не опустится до уровня, на котором температура поверхности заготовки станет ниже температуры плавления шлака. На данном уровне жидкая часть затвердевает. Далее образовавшийся шлаковый гарнисаж истирается поверхностью корки, трескается, крошится.

Шлаковая крошка увлекается поверхностью корки и высыпается из зазора между заготовкой и кристаллизатором [1 – 12].

Процессы формирования гарнисажа и жидкой пленки между кристаллизатором и поверхностью заготовки влияют на качество поверхности заготовки и стабильность разливки. В связи с этим проводятся экспериментальные и теоретические исследования указанных процессов.

Известны результаты исследования [1 – 12] толщины шлаковой прослойки между слитком и стенкой кристаллизатора. Согласно данным работы [1], толщина шлаковой прослойки в районе мениска составляет 0,7 – 1,7 мм для силикатных шлаков с температурой затвердевания 1080 – 1200 °С и 1,8 – 3,2 мм для бессиликатных шлаков с температурой затвердевания 1250 – 1290 °С. На расстоянии не более 200 мм от мениска металла существует постоянный контакт шлаковой прослойки со стенкой кристаллизатора, остальная

часть кристаллизатора работает при наличии газового зазора. Толщина шлаковой прослойки по данным работы [12] в конце мениска металла составляет 0,18–0,19 мм, на расстоянии 30–140 мм от мениска толщина шлаковой прослойки увеличивается до 0,33 мм. Затем, в результате возрастания ферростатического давления, толщина шлаковой прослойки уменьшается и составляет 0,3 мм.

Известные теоретические исследования [1–5] посвящены прогнозу толщины гарнисажа и пленки жидкого шлака. Однако в этих исследованиях не учитывается взаимное влияние процессов формирования гарнисажа и пленки, а также формирования толщины оболочки заготовки.

В настоящей работе предлагается математическая модель тепловых процессов в системе тел (слоев) из различных материалов «медная стенка кристаллизатора – гарнисаж – пленка жидкого шлака – оболочка слитка».

На рис. 1 представлена схема распределения температуры в поперечном сечении системы слоев из различных материалов от воды в медной стенке кристаллизатора до фронта затвердевания стали.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: «в» – вода; «м» – медная стенка кристаллизатора; «шт» – твердый шлак (гарнисаж); «шж» – жидкий шлак; «к» – корка; «ж» – расплав; δ_m – толщина рабочей стенки кристаллизатора; δ – толщина твердого шлака (гарнисажа); $l_{ш}$ – толщина слоя жидкого шлака; ε – толщина корки металла; 1–5 – номера границ.

При разработке математической модели примем допущение о линейности распределения температуры по толщине указанных слоев материалов (см. рис. 1). С учетом этих допущений можно записать выражения для полей температуры в локальных системах координат, связанных с рассматриваемым слоем слитка:

– медная стенка кристаллизатора:

$$T_m = T_{mb} + (T_{mg} - T_{mb}) \frac{x}{\delta_m}, \quad 0 \leq x \leq \delta_m; \quad (1)$$

– гарнисаж:

$$T_g = T_{mg} + (T_{zg} - T_{mg}) \frac{x}{\delta}, \quad 0 \leq x \leq \delta; \quad (2)$$

– жидкий шлак:

$$T_{zh} = T_{zg} + (T_{pc} - T_{zg}) \frac{x}{l_{ш}}, \quad 0 \leq x \leq l_{ш}; \quad (3)$$

– корка металла:

$$T_k = T_{pc} + (T_{kc} - T_{pc}) \frac{y}{\varepsilon}, \quad 0 \leq y \leq \varepsilon. \quad (4)$$

Условия на границах слоев материалов:

– граница «вода–медь»:

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} = \alpha(T_{mb} - T_b); \quad (5)$$

– контакт «медь–гарнисаж»:

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x}, \quad (6)$$

$$T_m = T_g; \quad (7)$$

– условие Стефана на фронте затвердевания шлака:

$$\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} = \lambda_{шж} \frac{\partial T_{шж}}{\partial x} + \rho_{шж} L_{ш} \frac{d\delta}{dt}, \quad (8)$$

$$T_g = T_{шж} = T_{zg}; \quad (9)$$

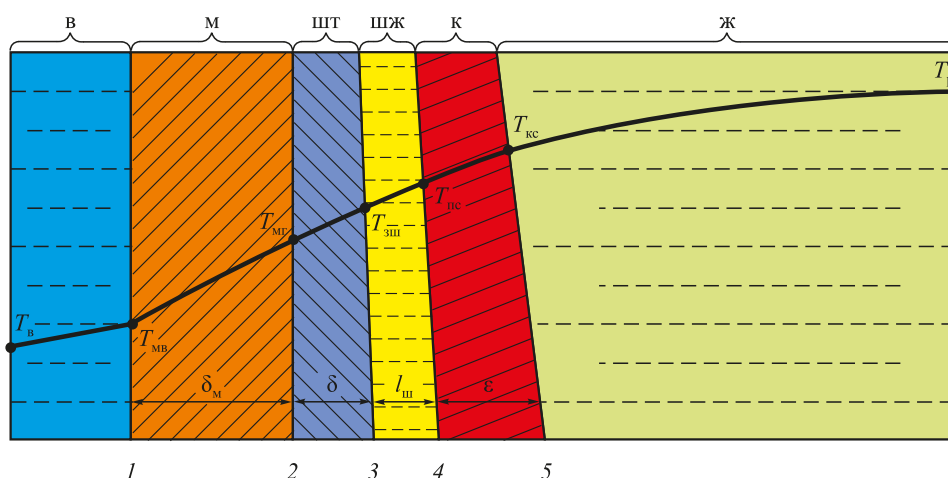


Рис. 1. Схема распределения температуры в поперечном сечении системы слоев из различных материалов от воды в медной стенке кристаллизатора до фронта затвердевания стали (обозначения в тексте)

Fig. 1. Diagram of temperature distribution in the cross-section of a system of layers of various materials from water in the mold's copper wall to the steel solidification front (designations – in text)

– контакт «жидкий шлак – поверхность корки»:

$$\lambda_{\text{шж}} \frac{\partial T_{\text{шж}}}{\partial x} = \lambda_{\text{к}} \frac{\partial T_{\text{к}}}{\partial y}, \quad (10)$$

$$T_{\text{шж}} = T_{\text{к}}; \quad (11)$$

– условие Стефана на фронте затвердевания стали:

$$\lambda_{\text{к}} \frac{\partial T_{\text{к}}}{\partial x} = \rho_{\text{с}} L_{\text{с}} \frac{d\varepsilon}{dt} + \alpha_{\text{р}} (T_{\text{р}} - T_{\text{кс}}), \quad (12)$$

$$T_{\text{к}} = T_{\text{кс}}, \quad (13)$$

где $T_{\text{в}}$ – температура охлаждающей воды в кристаллизаторе; $T_{\text{мв}}$ – температура медной стенки со стороны воды; $T_{\text{мг}}$ – температура медной стенки со стороны гарнисажа; $T_{\text{зш}}$ и $T_{\text{кс}}$ – температура затвердевания шлака и кристаллизации стали; $T_{\text{шж}}$ – температура жидкого шлака; $T_{\text{пс}}$ – температура поверхности слитка; $T_{\text{р}}$ – температура разливаемой стали; α – коэффициент теплоотдачи от стенки канала в кристаллизаторе к воде; $\delta = \delta(t)$ и $\varepsilon = \varepsilon(t)$ – толщины жидкого слоя шлака и корки; $L_{\text{ш}}$ и $L_{\text{с}}$ – теплота кристаллизации шлака и стали; $\rho_{\text{шж}}$ и $\rho_{\text{с}}$ – плотность жидкого шлака и стали; $\lambda_{\text{м}}, \lambda_{\text{г}}, \lambda_{\text{шж}}, \lambda_{\text{к}}$ – коэффициенты теплопроводности меди, гарнисажа, жидкого шлака и стали; $\alpha_{\text{р}}$ – коэффициент теплоотдачи от разливаемой стали к фронту кристаллизации.

Подставим в граничные условия (5), (6), (8), (10) и (12) выражения для производных от температурных полей (1) – (4). В результате получим систему уравнений относительно пяти неизвестных – $T_{\text{мв}}, T_{\text{мг}}, T_{\text{пс}}, \varepsilon$ и δ , которая включает обыкновенные дифференциальные и алгебраические уравнения:

– уравнение динамики толщины корки слитка:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{\rho_{\text{с}} L_{\text{с}}} \left[\frac{\lambda_{\text{к}} T_{\text{кс}} - T_{\text{зш}}}{\varepsilon} - \alpha_{\text{р}} (T_{\text{р}} - T_{\text{кс}}) \right]; \quad (14)$$

– уравнение динамики толщины гарнисажа:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{1}{\rho_{\text{шж}} L_{\text{ш}}} \left[\frac{\lambda_{\text{г}} (T_{\text{зш}} - T_{\text{мг}})}{\delta} - \frac{\lambda_{\text{шж}} (T_{\text{пс}} - T_{\text{зш}})}{l_{\text{ш}}} \right]; \quad (15)$$

– алгебраические выражения для определения температур поверхности слитка в контакте «медь – вода» и «медь – гарнисаж»:

$$T_{\text{пс}} = \frac{T_{\text{зш}} + \chi_1 T_{\text{кс}}}{1 + \chi_1}, \quad T_{\text{мв}} = \frac{T_{\text{мг}} + \chi_2 T_{\text{в}}}{1 + \chi_2}, \quad (16)$$

$$T_{\text{мг}} = \frac{\chi_2 T_{\text{в}} + \chi_3 T_{\text{зш}}}{\chi_2 + \chi_3},$$

$$\text{где } \chi_1 = \frac{\lambda_{\text{к}}}{\lambda_{\text{шж}}} \frac{\lambda_{\text{ш}}}{\varepsilon}, \quad \chi_2 = \frac{\alpha \delta_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}}, \quad \chi_3 = \frac{\lambda_{\text{т}}}{\lambda_{\text{м}}} \frac{\delta_{\text{м}} (1 + \chi_2)}{\delta}.$$

Начальные условия для интегрирования уравнений (14) и (15):

$$\delta = \delta_0; \quad \varepsilon = \varepsilon_0.$$

В качестве метода решения системы уравнений (14) – (16) выбран метод конечных разностей с явной схемой аппроксимации правой части. Алгоритм решения реализован в виде программы в пакете Mathcad 15.0.

Для иллюстрации возможностей модели на рис. 2 представлен пример результатов моделирования, полученных при решении системы (14) – (16) для следующих исходных данных: $v = 0,8$ м/мин; $\delta_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ м; $\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ м; $\lambda_{\text{ш}} = \lambda_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ м; $\delta_{\text{м}} = 0,03$ м; $\lambda_{\text{к}} = 29$ Вт/(м·К); $\lambda_{\text{м}} = 315$ Вт/(м·К); $\rho_{\text{с}} = 7000$ кг/м³; $L_{\text{с}} = 260$ кДж/кг; $\alpha = 25$ кВт/(м²·К); $\alpha_{\text{р}} = 10$ кВт/(м²·К) [13]; $T_{\text{в}} = 30$ °С; $T_{\text{кс}} = 1500$ °С; $T_{\text{р}} = 1520$ °С. Исходные данные для ШОС: $T_{\text{пл}} = 1160$ °С; $\lambda_{\text{т}} = 0,5$ Вт/(м·К); $\lambda_{\text{шж}} = 1,0$ Вт/(м·К); $L_{\text{ш}} = 175$ кДж/кг; $\rho_{\text{шж}} = 2500$ кг/м³.

На рис. 2 представлены кривые изменения толщины корки сляба, удельного теплового потока, температуры поверхности в середине широкой грани сляба и температуры медной стенки со стороны воды ($T_{\text{мв}}$) и со стороны гарнисажа ($T_{\text{мг}}$). Вместе с этим выполнено сравнение результатов расчета с известными из литературы [14 – 21] экспериментальными данными, в ходе которого установлена удовлетворительная адекватность модели.

Также с помощью модели выполнено исследование влияния скорости литья на распределение толщины жидкого шлака и гарнисажа по длине кристаллизатора МНЛЗ при разливке слябов сечением 1200×250 мм² из углеродистой стали. Результаты исследования представлены на рис. 3 в виде кривых изменения толщины жидкого шлака, гарнисажа и общей толщины этих слоев в кристаллизаторе при скоростях литья 0,8, 1,0 и 1,2 м/мин.

Согласно рис. 3, при $v = 0,8$; 1,0 и 1,2 м/мин шлаковая прослойка сохраняется на протяжении 0,331; 0,415 и 0,498 м от мениска металла соответственно. На этих горизонтах толщина гарнисажа имеет максимальное значение (0,77 мм), так как температура поверхности слитка достигает температуры затвердевания шлака. Далее шлаковый гарнисаж истирается поверхностью корки, трескается, крошится и высыпается из кристаллизатора.

Похожие результаты по динамике шлаковых слоев в кристаллизаторе получены авторами работ [22 – 23]. В частности, в работе [22] протяженность жидкого шлакового участка достигает 0,37 и 0,46 м при скоростях 1,07 и 1,25 м/мин соответственно. Можно считать, что отличие от результатов, полученных в настоящей работе не велико и обусловлено использованием в работе [22] других шлаковых составов, для которых приводятся не все данные по теплофизическим свойствам, температурам и теплоте плавления. При этом авторы работ [22 – 23] используют более сложное математическое описание, чем в настоящем исследовании.

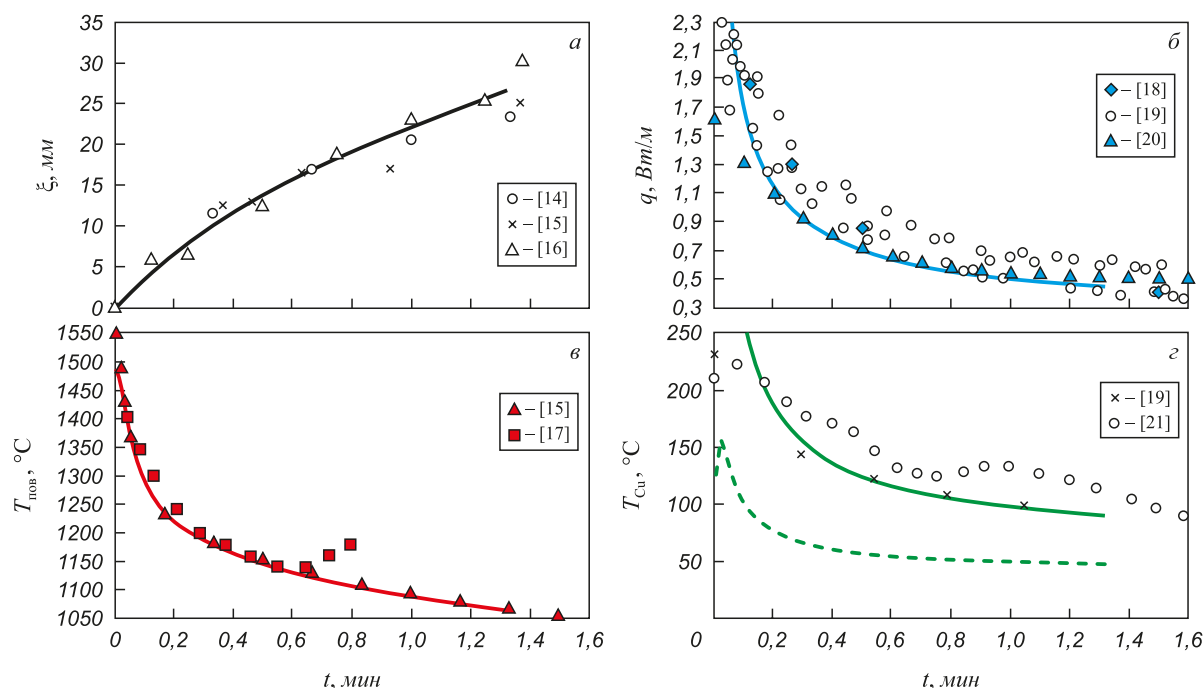


Рис. 2. Изменение толщины корки ξ (а), удельного теплового потока q (б), температуры поверхности слэба в середине широкой грани $T_{\text{пов}}$ (в) и температур $T_{\text{мг}}$ (—) и $T_{\text{мв}}$ (---) в кристаллизаторе (г) ([14–21] – экспериментальные данные)

Fig. 2. Change in thickness of the crust ξ (a), specific heat flux q (б), slab's surface temperature in the middle of the mold wide wall $T_{\text{пов}}$ (в) and mold's temperatures $T_{\text{мг}}$ (—) and $T_{\text{мв}}$ (---) в кристаллизаторе (г) ([14–21] – experimental data)

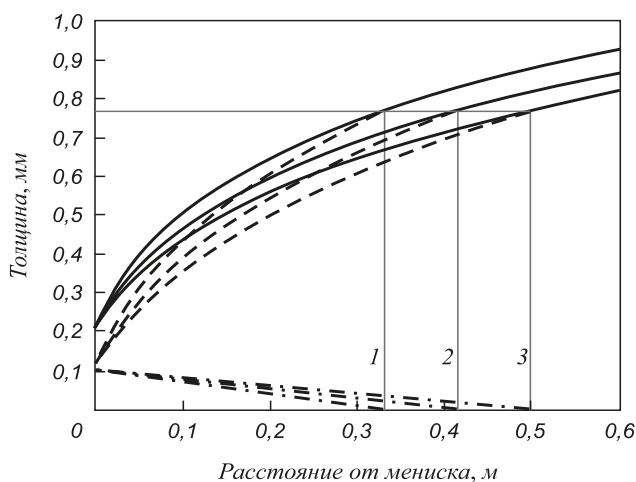


Рис. 3. Изменение толщины гарнисажа (---), жидкого шлака (---) и их общей толщины (—) по высоте кристаллизатора при различных скоростях разливки v , м/мин: 1 – 0,8; 2 – 1,0; 3 – 1,2

Fig. 3. Change in thickness of the skull (---), liquid slag (---) and their total thickness (—) along the height of the mold at different casting speeds (v) at m/min: 1 – 0.8; 2 – 1.0; 3 – 1.2

Таким образом, впервые разработано математическое описание взаимосвязанных процессов теплопередачи в системе слоев из различных материалов «медная стенка кристаллизатора – гарнисаж – пленка жидкого шлака – оболочка слитка». Разработанная модель позволяет прогнозировать динамику тепловых потоков, темпера-

тур, толщины корки слитка, шлакового гарнисажа и слоя жидкого шлака по высоте кристаллизатора, длину участка жидкостного трения в кристаллизаторе в зависимости от теплофизических параметров разливаемой стали и теплообмена между оболочкой и жидкой сталью.

Разработанная модель системы процессов позволит инженерам изучать системные эффекты. Модель может быть использована в следующих случаях.

- При выборе химического состава ШОС, а, следовательно, ее теплопроводности и температуры плавления, которые бы обеспечили необходимую длину участка жидкого шлака.

- При выборе профиля кристаллизатора с учетом не только линейных размеров поперечного сечения оболочки заготовки, но и толщины гарнисажа, что позволит уменьшить трение на участке образования гарнисажа, а, следовательно, сократить количество прорывов оболочки, возникающих за счет «прилипания» гарнисажа к поверхности оболочки.

- В учебных целях в качестве лабораторной работы в курсе разливки стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов и др. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
2. Бровман М.Я. О силах трения между слитком и кристаллизатором при непрерывной разливке стали // Металлы. 2003. № 6. С. 21 – 28.
3. Ермолаева Е.И., Лейтес А.В. и др. Температурные условия формирования шлакового покрытия при вертикальном вводе

- металла в кристаллизатор // Непрерывное литье стали. Тематический отраслевой сборник. 1981. № 7. С. 80 – 83.
4. Куклев А.В., Лейтес А.В. Практика непрерывной разливки стали. – М.: Metallurgizdat, 2011. – 432 с.
 5. Зайцев А.И., Лейтес А. В., Либерман А. Л. Физико-химические основы нового метода управления отводом тепла от слитка к кристаллизатору // Сталь. 2003. № 3. С. 70 – 74.
 6. Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Шахпазов Е.Х. Современные представления о шлаках для внепечной обработки и непрерывной разливки стали // Электromеталлургия. 2010. № 8. С. 2 – 11.
 7. Cho J., Shibata H., Emi T. Radiative heat transfer through mold flux film during initial solidification in continuous casting of steel // ISIJ Intern. 1998. Vol. 38. No. 3. P. 268 – 275.
 8. Mills K.C., Alistair B.F. The role of mould fluxes in continuous casting – so simple yet so complex // ISIJ Intern. 2003. Vol. 43. No. 10. P. 1479 – 1486.
 9. Meng Y., Thomas B.G. Simulation of microstructure and behaviour of interfacial mold slag layers in continuous casting of steel // ISIJ Intern. 2006. Vol. 46. No. 5. P. 660 – 669.
 10. Акмен Р.Г., Кубрик Б.И., Ильченко О.Т. О распределении тепловых потоков в кристаллизаторе МНЛЗ и слитке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 12. С. 110 – 114.
 11. Суворов С.А., Вихров Е.А. Совершенствование шлакообразующих смесей // Сталь. 2010. № 4. С. 38 – 42.
 12. Рудой Л.С. Моделирование на ЭВМ затвердевания и разнотолщинности корки слитка в кристаллизаторе // Изв. вуз. Черная металлургия. 1974. № 4. С. 144 – 148.
 13. Непрерывная разливка стали на радиальных установках / В.Т. Сладкоштанов, Р.В. Потанин, О.Н. Суладзе, В.С. Рутес. – М.: Металлургия, 1974. – 288 с.
 14. Рудой Л.С., Баптизмандский В.И. Производительность машин непрерывного литья заготовок. – К.: Техника, 1982. – 152 с.
 15. Гиря А.П., Убранович Л.И., Ермаков О.Н., Пестов В.И. Исследование процесса теплообмена в кристаллизаторе МНЛЗ // Повышение эффективности процесса непрерывного литья стали: Тематический отраслевой сборник. – М., 1983. С. 4 – 7.
 16. Клипов А.Д., Колпаков А.И., Чигринов М.Г., Баллад Э.Р. Физико-химические и теплофизические особенности непрерывной разливки под шлаком // Сталь. 1972. № 2. С. 124 – 128.
 17. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л.В. Буланов, Л.Г. Корзунин, Е.П. Парфенов и др. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 319 с.
 18. Журавлев В.А., Китаев Е.М. Теплофизика формирования непрерывного слитка. – М.: Металлургия, 1974. – 215 с.
 19. Китаев Е.М. Затвердевание стальных слитков. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
 20. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слабовых заготовок. – М.: Металлургия, 1991. – 272 с.
 21. Дожиков В.И. Теплофизические особенности формирования непрерывного слитка в кристаллизаторе МНЛЗ. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – 184 с.
 22. Ya Meng, Brian G. Thomas. Heat-Transfer and Solidification Model of Continuous Slab Casting: CONID // Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 34B. October 2003. P. 685 – 705.
 23. Ya Meng, Brian G. Thomas. Modeling transient slag-layer phenomena in the shell/mold gap in continuous casting of steel // Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 34B. October 2003. P. 707 – 725.

Поступила 7 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 1, pp. 63–68.

SIMULATION OF SLAG SKULL FORMATION ON THE WALL OF CCM MOLD

D.I. Gabelaya, Z.K. Kabakov, Yu.V. Gribkova

Cherepovets State University, Cherepovets, Vologda Region, Russia

Abstract. The processes of formation of the skull and liquid film between the mold and surface of the billet effect on quality indicators and stability of the continuous casting of steel. A number of theoretical studies devoted to the forecast of skull thickness and the film of liquid slag are known. However, these studies do not take into account the mutual influence of formation processes of skull and film, as well as formation of shell thickness of the billet. In this connection, the paper presents a mathematical model of interrelated thermal processes developed by the authors in the system of layers “copper wall of crystallizer – skull – film of liquid slag – crust of ingot”. The model makes it possible to predict the dynamics of formation of the thickness of the ingot crust, slag skull and the layer of liquid slag along the height of the mold and the length of liquid friction portion in it, depending on casting speed, temperature of casting steel and melting of the slag, thickness of the slab and working layer of the copper wall. The adequacy of the model to the object is determined by such parameters, as surface temperature of the billet, thickness of the crust, specific heat flux in the mold and temperature of the working wall. An example of application of the developed model is shown, in which the effect of casting speed on length of the liquid friction portion in the mold is investigated. It was found that at speeds of 0.8; 1.0 and 1.2 m/min the slag layer is retained for 0.331; 0.415 and 0.498 m from the meniscus of the metal, respectively. At the same time, the thickness of the skull reaches a maximum value of 0.77 mm. Further formation of the preform occurs in the absence of lubrication in the mold. The possibility of using the developed model by technologists for selecting the chemical composition of casting powder, which provides the required length of the liquid slag section, is

indicated by the designers when choosing the mold profile, taking into account the thickness of the skull, and, also for educational purposes.

Keywords: continuous casting machine, mold, heat transfer, slag-forming mixture, slag skull, math model.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-63-68

REFERENCES

1. Rutes V.S., Askol'dov V.I., Evteev V.P., Genkin V.Ya., Chigriнов M.G., Manokhin A.I. *Teoriya nepreryvnoi razlivki* [Continuous casting theory]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 296 p. (In Russ.).
2. Brovman M.Ya. On the friction forces between billet and mold on continuous casting of steel. *Metally*. 2003, no. 6, pp. 21–29. (In Russ.).
3. Ermolaeva, E.I., Leites A.V. etc. Temperature conditions for the formation of slag coating during the vertical entry of metal into the mold. In: *Nepreryvnoe lit'e stali. Tematicheskii otraslevoi sbornik* [Continuous casting of steel. Thematic branch collection]. 1981, no. 7, pp. 80–83. (In Russ.).
4. Kuklev A.V., Leites A.V. *Praktika nepreryvnoi razlivki stali* [Practice of continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2011, 432 p. (In Russ.).
5. Zaitsev A.I., Leites A.V., Liberman A. L. Physicochemical basis of the new method of control of heat removal from the ingot to the mold. *Stal'*. 2003, no. 3, pp. 70–74. (In Russ.).
6. Zaitsev A.I., Mogutnov B.M., Shakhpaзov E.Kh. Modern concepts of slags for out-of-furnace processing and continuous casting of steel. *Elektrometallurgiya*. 2010, no. 8, pp. 2–11. (In Russ.).
7. Cho J., Shibata N., Emi T. Radiative heat transfer through mold flux film during initial solidification in continuous casting of steel. *ISIJ International*. 1998, vol. 38, no. 3, pp. 268–275.

8. Mills K.C., Alistair B.F. The role of mold fluxes in continuous casting – so simple yet so complex. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 10, pp. 1479–1486.
9. Meng Y., Thomas B.G. Simulation of microstructure and behavior of interfacial mold slag layers in continuous casting of steel. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 5, pp. 660–669.
10. Akmen R.G., Kubrik B.I., Il'chenko O.T. On the heat fluxes distribution in CCM mold and in the ingot. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 12, pp. 110–114. (In Russ.).
11. Suvorov S.A., Vikhrov E.A. Improvement of slag-forming mixtures for continuous-casting machine molds. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 4, pp. 341–346.
12. Rudoi L.S. Computer simulation of solidification and heterogeneity of the ingot's crust in the mold. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1974, no. 4, pp. 144–148. (In Russ.).
13. Sladkoshteev V.T., Potanin R.V., Suladze O.N., Rutes V.S. *Nepre-ryvnaya razlivka stali na radial'nykh ustanovkakh* [Continuous casting of steel on radial installations]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 288 p. (In Russ.).
14. Rudoi L.S., Baptizanskii V.I. *Proizvoditel'nost' mashin nepre-ryvnogo lit'ya zagotovok* [Productivity of continuous casting machines]. Kiev: Tekhnika, 1982, 152 p. (In Russ.).
15. Giryа A.P., Ubranovich L.I., Ermakov O.N., Pestov V.I. Investigation of heat transfer process in the CCM mold. In: *Povyshenie effektivnosti protsessа nepreryvnogo lit'ya stali: Tematicheskii otrasle-voi sbornik* [Improvement of the efficiency of continuous casting of steel: Thematic branch collection]. Moscow: 1983, pp. 4–7. (In Russ.).
16. Klipov A.D., Kolpakov A.I., Chigrinov M.G., Ballad E.R. Physical-chemical and thermophysical features of continuous casting under slag. *Stal'*. 1972, no. 2, pp. 124–128. (In Russ.).
17. Bulanov L.V., Korzunin L.G., Parfenov E.P. etc. *Mashiny nepre-ryvnogo lit'ya zagotovok. Teoriya i raschet* [CCM. Theory and calculation]. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr PR i reklamy "Marat", 2004, 319 p. (In Russ.).
18. Zhuravlev V.A., Kitaev E.M. *Teplofizika formirovaniya nepre-ryvnogo slitka* [Thermophysics of continuous ingot formation]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 215 p. (In Russ.).
19. Kitaev E.M. *Zatverdevanie stal'nykh slitkov* [Crystallization of steel ingots]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 168 p. (In Russ.).
20. Niskovskikh V.M., Karlinskii S.E., Berenov A.D. *Mashiny nepre-ryvnogo lit'ya slyabovykh zagotovok* [Machines for continuous casting of slab billets]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 272 p. (In Russ.).
21. Dozhdikov V.I. *Teplofizicheskie osobennosti formirovaniya nepre-ryvnogo slitka v kristallizatore MNLZ: monografiya* [Thermophysical features of the formation of continuous ingot in a CCM mold]. Lipetsk: LGTU, 2007, 184 p. (In Russ.).
22. Ya Meng, Brian G. Thomas. Heat-transfer and solidification model of continuous slab casting: CON1D. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Vol. 34B, October 2003, pp. 685–705.
23. Ya Meng, Brian G. Thomas. Modeling transient slag-layer phenomena in the shell/mold gap in continuous casting of steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Vol. 34B, October 2003, pp. 707–725.

Information about the authors:

D.I. Gabelaya, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metallurgy, Machine Building and Technological Equipment
Z.K. Kabakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy, Machine Building and Technological Equipment
Yu.V. Gribkova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mathematics and Informatics (150475@mail.ru)

Received March 7, 2016