

УДК 669.001.5.04

З.К. Кабаков, М.А. Пахолкова

Череповецкий государственный университет

РОЛЬ ШЛАКА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ МЕТАЛЛА В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния толщины слоя шлака на различные параметры охлаждения металла в сталеразливочном ковше емкостью 350 т. Исследование выполнено с помощью двумерной математической модели. С помощью математического моделирования установлена существенная роль шлака при охлаждении металла в сталеразливочном ковше, потери тепла через шлак составляют 60 – 70 %. Установлено и объяснено явление «самозапирания» теплопотерь металла в ковше при образовании твердой корки на поверхности шлака. Определена оптимальная толщина слоя шлака, равная 0,15 – 0,20 м. Полученные результаты могут быть использованы в производственной практике с целью снижения потерь тепла при выпечной обработке металла.

Ключевые слова: ковш, скорость охлаждения, шлак, тепловые потери.

SLAG ROLE WHEN COOLING METAL IN A CASTING LADLE

Abstract. The results of research of influence of thickness of slag are presented on the different parameters of cooling of metal in a ladle capacity of 350 ton. The research is carried by means of two-dimensional mathematical model. By means of mathematical modeling the essential role of slag is established when cooling metal in a ladle, heat losses through slag are 60 – 70 %. Established and explained the phenomenon of “self-locking” heat of the metal in the ladle during the formation of a hard crust on the surface of the slag. The optimum thickness of the slag is 0,15 – 0,20 m. The results can be used in industrial practice in order to reduce heat losses during secondary treatment technology.

Keywords: ladle, speed of cooling, slag, thermal losses.

Основным способом доводки металла по химическому составу и температуре в современном конвертерном производстве является выпечная обработка стали. В процессах выпечной обработки, в частности при выдержке и транспортировке металла в ковше, необходимо учитывать снижение температуры стали, которое зависит от тепловых потерь через шлак и футеровку ковша.

В связи с этим возникает необходимость в изучении влияния различных факторов на тепловые потери и в их точной оценке. Для решения этой задачи разработана двумерная математическая модель охлаждения стали в ковше [1], при построении которой были использованы следующие допущения об элементах, процессах и связях: сталеразливочный ковш имеет цилиндрическую форму; ковш является термически тонким телом; охлаждение ковша с металлом происходит в симметричных относительно оси ковша условиях; теплообмен между шлаком и металлом, металлом и футеровкой, слоями футеровки осуществляется через идеальный контакт; теплоотдача от крышки, кожуха происходит излучением и конвекцией; теплообмен между крышкой и шлаком происходит излучением и свободной конвекцией; металл охлаждается путем теплопередачи через футеровку и шлак к окружающей среде (в случае наличия крышки происходит теплообмен между крышкой и шлаком); шлак может затвердевать в процессе охлаждения; охлаждение шлака происходит путем излучения и свободной конвекции воздуха; теплофизические свойства не зависят от температуры; в начальный момент времени распределение температуры по объему

ковша равномерно; режим теплопередачи через футеровку – квазистационарный.

Область моделирования представляет собой половину сечения объема металла и шлака вдоль вертикальной оси ковша.

С учетом принятых допущений математическое описание общего процесса теплопроводности состоит из двух двумерных подмоделей: сталь и шлак.

Подмодель сталь включает:

– двумерное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) + \frac{1}{r_s} \frac{\partial}{\partial r_s} \left(\lambda_{\text{эф}} r_s \frac{\partial T_s}{\partial r_s} \right), \quad (1)$$

где $0 \leq t \leq t_k$, $0 \leq r_s \leq R$, $0 \leq z_s \leq H$ – область интегрирования уравнения (1); c_s , ρ_s и $\lambda_{\text{эф}}$ – теплоемкость, плотность и эффективный коэффициент теплопроводности стали; t_k – конечное значение времени; R – радиус ковша; H – высота объема стали.

– начальное условие:

$$T(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_s^0 = \text{const}; \quad (2)$$

– граничные условия:

Г1: на оси симметрии при $0 \leq z_s \leq H$, $r_s = 0$

$$\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_s}{\partial r_s} = 0, \quad (3)$$

где T_s – температура стали на границе **Г1**.

Г2: условие контакта на границе сталь – шлак при $0 \leq r_s \leq R, 0 \leq r_{sh} \leq R, z_s = H_s$:

$$\begin{cases} \lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_s}{\partial z_s} = \lambda_{\text{эф,sh}} \frac{\partial T_{sh}}{\partial z_{sh}}; \\ T_{k_s} = T_{k_{sh}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{эф,sh}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности шлака; T_{k_s} и $T_{k_{sh}}$ – температура стали и шлака на границе сталь – шлак.

Г3: теплопередача от стали к окружающей среде через четырехслойную футеровку стенки ковша

$$\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_s}{\partial r_s} = -k_{st}(T_{s_3} - T_{\text{о.с.}}), \quad (5)$$

где k_{st} – коэффициент теплопередачи через четырехслойную стенку ковша к окружающей среде; T_{s_3} – температура стали на границе **Г3**; $T_{\text{о.с.}}$ – температура окружающей среды.

Г4: теплопередача от стали к окружающей среде через пятислойную футеровку днища ковша

$$\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_s}{\partial z_s} = -k_d(T_{s_4} - T_{\text{о.с.}}), \quad (6)$$

где k_d – коэффициент теплопередачи через пятислойное днище ковша к окружающей среде; T_{s_4} – температура стали на границе **Г4**.

Механический перенос тепла при продувке аргоном и термоконвекции учитывается с помощью эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}} = \lambda_s(\varepsilon_{\text{Ар}} + \varepsilon_{\text{тк}})$, где $\varepsilon_{\text{Ар}}$ – коэффициент, учитывающий вынужденную конвекцию при продувке металла аргоном, $\varepsilon_{\text{тк}}$ – коэффициент, учитывающий свободную конвекцию в ограниченном объеме.

Подмодель шлак включает:

– двумерное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$c_{\text{эф}} \rho_{sh} \frac{\partial T_{sh}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{эф,sh}} \frac{\partial T_{sh}}{\partial z_{sh}} \right) + \frac{1}{r_{sh}} \frac{\partial}{\partial r_{sh}} \left(\lambda_{\text{эф,sh}} r_{sh} \frac{\partial T_{sh}}{\partial r_{sh}} \right), \quad (7)$$

где $0 \leq t \leq t_k$; $0 \leq r_{sh} \leq R$; $0 \leq z_{sh} \leq L_{sh}$ – область интегрирования уравнения (7); $c_{\text{эф}}$ и $\lambda_{\text{эф,sh}}$ – эффективные теплоемкость и коэффициент теплопроводности шлака; ρ_{sh} и L_{sh} – плотность и толщина слоя шлака.

– начальное условие:

$$T(r, z, t)_{sh} |_{t=0} = T_{sh}^0 = \text{const}; \quad (8)$$

– граничные условия:

Г5: граничное условие на оси симметрии при $0 \leq z_{sh} \leq L_{sh}, r_{sh} = 0$:

$$\lambda_{\text{эф,sh}} \frac{\partial T_{sh}}{\partial r_{sh}} = 0, \quad (9)$$

Г6: теплопередача от шлака к окружающей среде (в обычных условиях при отсутствии крышки):

$$\lambda_{\text{эф,sh}} \frac{\partial T_{sh}}{\partial z_{sh}} \Big|_{z_{sh}=L_{sh}} = -\alpha_{sh}(T_{\text{пов,sh}} - T_{\text{о.с.}}), \quad (10)$$

где α_{sh} – суммарный коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией от поверхности шлака; $T_{\text{пов,sh}}$ – температура поверхности шлака.

Г7: теплопередача от шлака к окружающей среде через четырехслойную футеровку стенки ковша

$$\lambda_{\text{эф,sh}} \frac{\partial T_{sh}}{\partial r_{sh}} = -k_{st_1}(T_{sh_7} - T_{\text{о.с.}}), \quad (11)$$

где k_{st_1} – коэффициент теплопередачи через четырехслойную стенку ковша к окружающей среде; T_{sh_7} – температура шлака на границе **Г7**.

Г8: условие контакта на границе сталь – шлак соответствует граничному условию **Г2** для подмодели сталь.

При математическом описании выделения теплоты при затвердевании шлака выбрана статическая модель в соответствии с работой [2].

Механический перенос тепла в шлаке при продувке аргоном и термоконвекции учитывается с помощью эффективного коэффициента теплопроводности в ограниченном объеме с учетом уменьшения толщины слоя жидкого шлака при его затвердевании.

С помощью математической модели было изучено влияние толщины шлака на тепловые потери металла в сталеразливочном ковше емкостью 350 т для условий Череповецкого металлургического комбината ОАО «Северсталь». При исследовании приняли следующие исходные данные: радиус ковша – 2,08 м; уровень металла в ковше – 3,7 м; масса металла – 350 т; начальная температура металла и шлака – 1600 °С; плотность жидкой стали и шлака 7000 и 3320 кг/м³; кинематическая вязкость жидкой стали и шлака $3,5 \cdot 10^{-7}$ и $3,0 \cdot 10^{-6}$ м²/с соответственно.

На рис. 1 представлены тепловые потери металла в ковше при различной толщине слоя шлака, из которого видно, что при увеличении толщины слоя шлака от 0,05 до 0,25 м тепловой поток через шлак уменьшается на 24 %, а через стенки и днище – изменяются незначительно.

На рис. 2 показан состав тепловых потерь во время транспортировки ковша при толщине слоя шлака 0,15 м. Как видно на рис. 1 и 2, потери тепла от металла главным образом определяются потоком тепла через шлак к окружающей среде, доля которых составляет 68 %.

На рис. 3 представлены результаты исследования влияния толщины слоя шлака на скорость охлаждения

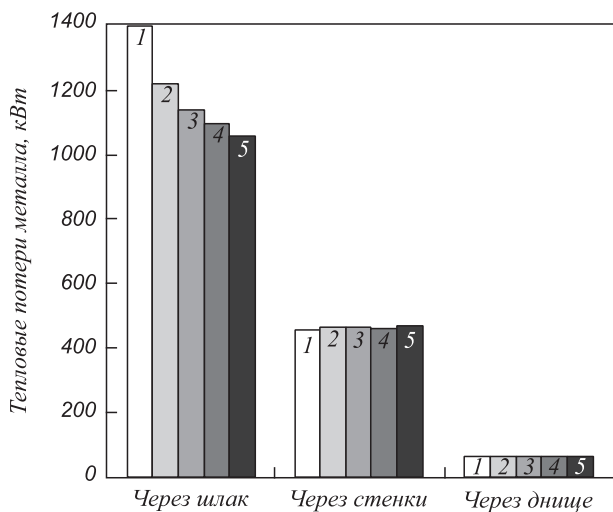


Рис. 1. Тепловые потери металла в ковше при различной толщине слоя шлака: 1 – 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – 0,20 м; 5 – 0,25 м

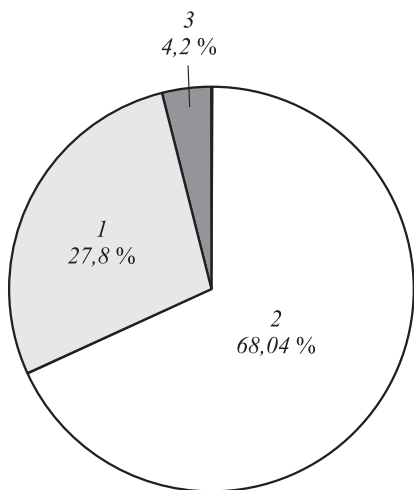


Рис. 2. Диаграмма состава тепловых потерь при охлаждении стали в ковше во время транспортировки при толщине слоя шлака 0,15 м: 1 – тепловые потери через стенки сталеразливочного ковша; 2 – через шлак; 3 – через днище

ния металла, из которого видно, что средняя скорость охлаждения металла уменьшается в 1,5 раза при увеличении толщины шлака от 0,05 до 0,25 м. Следует отметить, что при увеличении толщины от 0,05 до 0,15 м скорость охлаждения уменьшается в 1,3 раза, при увеличении толщины слоя шлака от 0,2 до 0,3 м – в 1,04 раза. Таким образом, при толщине слоя шлака более 0,20 м влияние этого фактора на скорость охлаждения стали уменьшается, но, по-видимому, возрастут тепловые потери на плавление шлака необходимого для увеличения его толщины. Таким образом, рационально толщину слоя шлака поддерживать равной 0,15 – 0,20 м.

На рис. 4 представлено изменение удельного потока тепла и температуры поверхности шлака во времени при толщине шлака 0,05 и 0,25 м. При этом в начальный момент времени температура шлака одинакова и

равна 1600 °С, что соответствует тепловому состоянию после заполнения ковша. Как видно на рис. 4, при толщине шлака 0,05 м удельный поток за 2 мин уменьшается в 3 раза, а при толщине 0,25 м – в 2,2 раза, при этом температуры поверхности шлака для толщины 0,05 м уменьшается в 1,4 раза, а для толщины 0,25 м – в 1,3 раза. Такое снижение удельного теплового потока от шлака (рис. 4, а) связано с резким снижением температуры поверхности шлака (рис. 4, б) и с началом образования твердой корки шлака (рис. 5).

Образование корки создает малотеплопроводный слой по сравнению с жидким шлаком, в котором теплоперенос выше в связи с термоконвекцией. Эти процессы развиваются взаимосвязано и одновременно, что и приводит к «самозапиранию» теплоты металла под слоем шлака.

Выводы. С помощью математического моделирования установлена существенная роль шлака при охлаждении металла в сталеразливочном ковше, потери тепла через шлак составляют 60 – 70 %. Установлено и объяснено явление «самозапирания» теплотерь

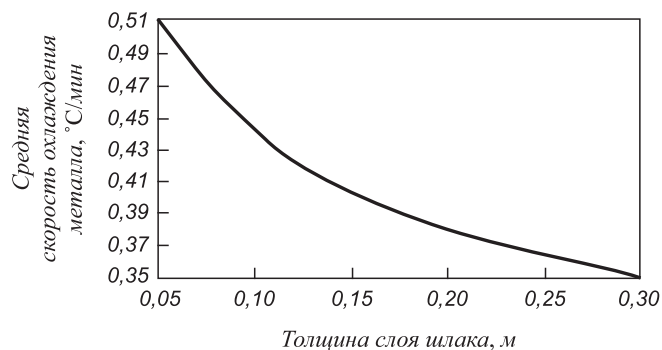


Рис. 3. Средняя скорость охлаждения металла при различной толщине слоя шлака

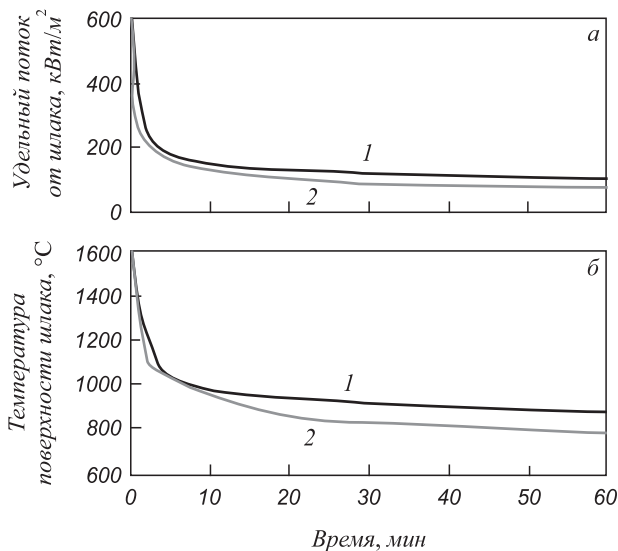


Рис. 4. Удельные тепловые потоки от шлака к окружающей среде (а), температура поверхности шлака (б): 1 – толщина слоя шлака 0,05 м; 2 – 0,25 м

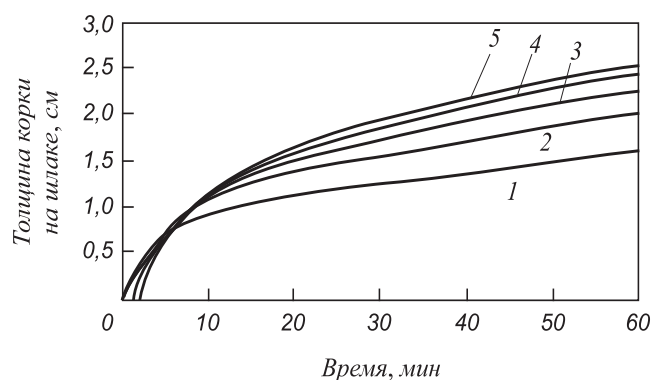


Рис. 5. Динамика роста корки шлака при различной его толщине: 1 – 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – 0,20 м; 5 – 0,25 м

металла в ковше при образовании корочки шлака. Рекомендуется поддерживать толщину слоя шлака равной 0,15 – 0,20 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабаков З.К., Пахолкова М.А. – В кн.: Материалы XI Межвузовской заочной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов. – Череповец: изд. ЧГУ, 2010. С. 104 – 108.
2. Самойлович Ю.А., Крулевецкий В.А., Горяинов С.А., Кабаков З.К. Тепловые процессы при непрерывном литье стали. – М: Металлургия, 1982. – 152 с.

© 2013 г. З.К. Кабаков, М.А. Пахолкова
Поступила 24 мая 2012 г.

УДК 621.771.26

А.Р. Фастыковский

Сибирский государственный индустриальный университет

ПРОДОЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛОСЫ ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМЫ ПРОКАТНАЯ КЛЕТЬ – НЕПРИВОДНОЙ ИНСТРУМЕНТ

Аннотация. Показана необходимость учета продольной устойчивости полосы при работе системы прокатная клеть – не приводной инструмент. Предложены зависимости для определения расстояния между прокатной клетью и не приводным инструментом, обеспечивающего продольную устойчивость полосы. Рассмотрены с точки зрения выполнения условия продольной устойчивости процессы: прокатки в приводной-не приводной клетки, прокатки-разделения с использованием не приводного делительного инструмента и даны соответствующие рекомендации.

Ключевые слова: продольная устойчивость полосы, прокатная клеть, делительный инструмент, очаг деформации.

LONGITUDINAL STABILITY OF THE BAND AT THE SYSTEM OF ROLLING STAND – NON-DRIVE TOOL

Abstract. The necessity of taking into account the longitudinal stability of band during the work of the system of rolling stand – non-drive tool is shown. Proposed to determine the dependence of the distance between the roll cage and non driven tools, which provides longitudinal stability bars. Considered from the perspective of the condition of the longitudinal stability of processes: rolling in the drive – non drive cage, rolling-the separation of the non-drive dividing tools and given appropriate recommendations.

Keywords: longitudinal stability of the band, rolling stand, separation tool, deformation.

В последнее время получили развитие методы обработки металлов давлением, предусматривающие использование наряду с прокатной клетью не приводного инструмента, работа которого обеспечивается использованием возможностей сил трения в очаге деформации. К наиболее известным методам, работающим по такой схеме, относят прокатку в приводной-не приводной клетки [1, 2], прокатку-разделение с использованием не приводного инструмента [3, 4]. Необходимая мощность для совершения работы не приводным инструментом передается от приводной клетки посредством продольной подпирательной силы, величина которой достигает 0,3 – 0,5 от усилия прокатки. При этом, учитывая, что не приводной инструмент находится на некотором расстоянии от приводной клетки, возникает

опасность потери продольной устойчивости полосы в промежутке между приводной клетью и не приводным инструментом. Несмотря на важность, вопрос продольной устойчивости полосы при использовании не приводного инструмента в литературе освещен недостаточно, что в свою очередь затрудняет определение рациональной компоновки оборудования, допустимых режимов обработки.

Рассмотрим вопрос определения продольной устойчивости на примере прокатки в приводной-не приводной клетки. Такой прием обработки характеризуется большими значениями продольной силы, необходимой для деформирования в не приводной клетки, что обуславливает возможность потери продольной устойчивости полосы в промежутке между клетями. Для определения