

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ УСТРОЙСТВА ВЫПУСКА СТАЛИ С МЕДНЫМ ОХЛАЖДАЕМЫМ ШИБЕРНЫМ ЗАТВОРОМ

ТИЩЕНКО П.И., ТИМОШЕНКО С.Н., ШЕВЧЕНКО В.П. (ДонГТУ), ЗУЙКОВА З.Г. (ДонГУ)

Разработана математическая модель тепловой работы медного водоохлаждаемого шиберного затвора устройства выпуска стали. Получены данные о эволюции корки металла на плите затвора и роли охлаждения на различных этапах рабочего цикла устройства.

Перспективным направлением совершенствования конструкций сталеплавильных агрегатов, в частности, дуговых печей высокой мощности, является применение устройств донного выпуска стали [1]. Актуальной задачей является повышение стойкости элементов выпускного канала и затвора. Это может быть достигнуто применением водоохлаждаемых элементов с защитой от воздействия струи кристаллизующейся коркой металла взамен традиционных керамических материалов.

Рассмотрим процесс перекрытия канала устройства донного выпуска стали равномерно движущимся медным шиберным затвором. Для оценки тепловой работы неохлаждаемого и охлаждаемого затвора разработана физическая и математическая модели.

Струя жидкого металла с температурой T_s в прямоугольном канале сечением $d \times d$ м² перекрывается медной плитой размерами: длина — L ; ширина — p ; толщина — b (рисунок 1, а). Начальная температура плиты — T_0 , текущая — T . Скорость движения плиты постоянна и равна u . Коэффициент теплоотдачи от струи металла к плите — α . Нижняя часть плиты может быть выполнена водоохлаждаемой по всей длине или части длины L^* . Коэффициент теплоотдачи от плиты к воде — α_w , температура воды — T_w .

Ввиду высокой теплопроводности меди полагаем, что текущая температура T вдвинутой в расплав части плиты одинакова по сечению и зависит только от времени t .

В контакте с расплавом на поверхности плиты образуется корка металла. Температура ее поверхности равна температуре плавления расплава T_m . В процессе перекрытия канала толщина корки Z изменяется. Характер эволюции корки в модели принят одинаковым на всей поверхности контакта со струей.

Пусть в произвольный момент времени длина части плиты, вдвинутой в канал, равна x (рисунок 1, а). Краевыми эффектами при движении плиты бесконечной ширины пренебрегаем. В момент $t=0$: $x=x_0$, в момент t : $x=x_0+ut$.

Величина плотности теплового потока, проникающего в медную плиту через корку, определяется законом Фурье:

$$q = \lambda \cdot \frac{T_m - T}{Z}, \quad (1)$$

где λ — теплопроводность корки, Вт/м·К.

Она состоит из плотности теплового потока от жидкого металла к корке, выражаемой законом Ньютона:

$$q_1 = \alpha(T_s - T_m)$$

и плотности теплового потока, выделяемой (поглощаемой) в процессе эволюции корки:

$$q_2 = \rho \cdot r \cdot \frac{dZ}{dt},$$

где ρ — плотность корки, кг/м³; r — скрытая теплота плавления корки, Дж/кг.

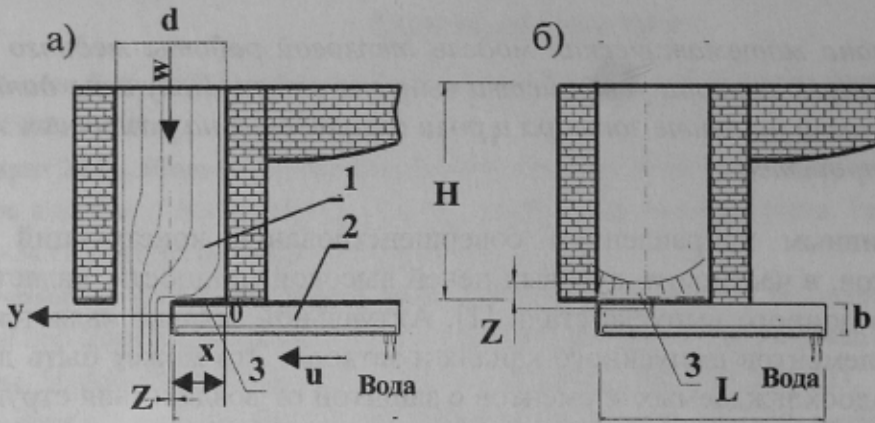


Рисунок 1 — Физическая модель устройства выпуска стали: а — процесс перекрытия канала; б — после перекрытия канала; 1 — выпускной канал; 2 — плита шибберного затвора; 3 — корка металла.

Тогда:

$$\lambda \cdot \frac{T_m - T}{Z} = \alpha(T_s - T_m) + \rho \cdot r \cdot \frac{dZ}{dt}. \quad (2)$$

С другой стороны, тепловой поток, полученный плитой через поверхность контакта со струей равен:

$$\lambda \cdot \frac{T_m - T_0}{Z} \cdot (b + x) \cdot p, \quad (3)$$

где p — ширина плиты, м.

Тепловой поток, переданный воде, определяется как:

$$\alpha_w \cdot (T - T_w). \quad (4)$$

Разность указанных тепловых потоков равна количеству тепла, необходимого для увеличения температуры плиты на dT за период времени dt :

$$\rho_1 \cdot b \cdot x \cdot p \cdot \frac{dT}{dt}.$$

Тогда из (3), (4) получим:

$$\lambda \cdot \frac{T_m - T_0}{Z} \cdot (b + X) \cdot p - \alpha_w \cdot (T_0 - T_w) \cdot L \cdot p = \rho_1 \cdot b \cdot X \cdot c_1 \cdot \frac{dT}{dt} \cdot p, \quad (5)$$

где λ — теплопроводность корки, Вт/м·К; ρ — плотность корки, кг/м³; ρ_1 — плотность меди, кг/м³; c_1 — теплопроводность меди, Вт/м·К.

Введем следующие выражения: $\varphi=(T_m-T)$; $k_1=\lambda/r\rho$; $k_2=\alpha(T_s-T_m)/r\rho$; $k_3=\lambda/(bc_1\rho_1)$; $k_4=\alpha_w L/(bc_1\rho_1)$, где r — скрытая теплота кристаллизации корки, Дж/кг; α — коэффициент теплоотдачи от струи металла к плите затвора, Вт/м²·К.

Полученная из приведенных выше выражений система уравнений:

$$\frac{dZ}{dt} = k_1 \cdot \frac{\varphi}{Z} - k_2$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -k_3 \cdot \frac{b + x_0 + ut}{x_0 + ut} \cdot \frac{\varphi}{Z} - k_4 \cdot \frac{\varphi - (T_m - T_w)}{x_0 + ut}, \quad (6)$$

отображает временную зависимость температуры плиты шиберного затвора и толщины корочки металла на поверхности плиты.

Оценка теплового состояния плиты после закрытия канала. После перекрытия канала скорость потока металла резко падает. Поэтому можно рассматривать задачу теплопроводности через кристаллизующуюся колонну металла в канале к охлаждаемой (или неохлаждаемой) медной плите шиберного затвора (рисунок 1 б). Процесс нагрева плиты за счет теплопроводности через корку при одновременном охлаждении плиты описывается следующим уравнением:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot b \cdot d \cdot p \cdot \frac{dT}{dt} = \left[\lambda \cdot \frac{T_m - T}{Z} - \alpha_w \cdot (T - T_w) \right] \cdot d \cdot p. \quad (7)$$

Из (7) получим зависимость температуры плиты от времени:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot b} \cdot \frac{T_m - T}{Z} - \frac{\alpha_w \cdot (T - T_w)}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot b}. \quad (8)$$

С другой стороны, нагрев корки происходит за счет теплопроводности из объема металла в канале и, дополнительно, за счет скрытой теплоты кристаллизации корки. Этот процесс отображается уравнением:

$$\lambda \cdot \frac{T_m - T}{Z} = \lambda_l \cdot \frac{\Delta T_l}{H} + \rho \cdot r \cdot \frac{dZ}{dt}, \quad (9)$$

где H — высота канала, м; ΔT_l — разность между температурой ванны печи T_b и температурой корки в контакте с жидким металлом T_m , К; λ_l — теплопроводность жидкого металла, Вт/м·К.

Отсюда получим следующую зависимость толщины корки на плите шиберного затвора от времени:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot r} \cdot \frac{T_m - T}{Z} - \frac{\lambda_l}{\rho \cdot r} \cdot \frac{\Delta T_l}{H}. \quad (10)$$

Дополнительно к ранее введенным выражениям k_1, k_2, k_3, k_4 запишем:

$$k_5 = \frac{\lambda_l}{\rho \cdot r} \cdot \frac{T_b - T_m}{H};$$

$$k_6 = \frac{\alpha_w}{\rho_1 \cdot c_1 \cdot b}.$$

Получим систему уравнений, отображающую временную зависимость толщины корки на медной плите шибберного затвора и температуры плиты:

$$\frac{dZ}{dt} = k_1 \cdot \frac{\varphi}{Z} - k_5; \quad (11)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -k_3 \cdot \frac{\varphi}{Z} + k_6 \cdot [(T_m - T_w) - \varphi].$$

Оценка величины коэффициента теплоотдачи от струи металла к плите. Из критериального уравнения переноса тепла в жидкой турбулентной среде [2]:

$$Nu = \alpha \cdot d / \lambda_l = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}. \quad (12)$$

Выражение для коэффициента теплоотдачи будет следующим:

$$\alpha = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \lambda_l / d, \quad (13)$$

где $Re = w^* \cdot d / \nu$ — число Рейнольдса; ν — кинематическая вязкость жидкого металла, m^2/c ; d — диаметр канала, м; $Pr = \rho c \nu / \lambda$ — число Прандтля; λ_l — теплопроводность жидкой стали, Вт/м·К; c — теплоемкость жидкой стали, Дж/кг·К; ρ — плотность жидкой стали, кг/м³; $w^* = (w^2 + u^2)^{0,5}$ — взаимная относительная скорость плиты и струи, м/с; w — скорость воды, м/с; u — скорость плиты, м/с.

Для нижеперечисленных значений входящих параметров: $d=0,18$ м; $c=650$ Дж/кг·К; $w=4,45$ м/с; $u=1$ м/с; $\rho=7000$ кг/м³; $\nu=0,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda=29$ Вт/м·К оценка величины α составит 89000 Вт/м²·К.

Оценка равновесной толщины корки на плите шибберного затвора.

Из первого уравнения системы уравнений (6) найдем условие постоянства толщины корки:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot r} \cdot \frac{\varphi}{Z} - \frac{\alpha_w \cdot (T_s - T_m)}{\rho \cdot r} = 0.$$

Отсюда получим уравнение для максимальной устойчивой толщины корки на плите (Z^*):

$$Z^* = \frac{\varphi \cdot \lambda}{\alpha \cdot (T_s - T_m)}. \quad (14)$$

Результаты расчетов. Результаты расчетов приведены на рисунках 2–4.

Численное решение системы уравнений (6) выполнено методом Эйлера [3] для следующих значений параметров: $\rho=7500$ кг/м³; $\rho_1=8900$ кг/м³; $\lambda=30$ Вт/м·К; $\lambda_l=28$ Вт/м·К; $c_1=390$ Дж/кг·К; $r=270000$ Дж/кг; $d=0,18$ м; $T_s=1650^\circ\text{C}$; $T_m=1530^\circ\text{C}$; $T_o=T_w=30^\circ\text{C}$; $\alpha=89000$ Вт/м²·К; $\alpha_w=5000$ Вт/м²·К; $H=1$ м.

Согласно приведенным на рисунке 2 данным, толщина корки металла на поверхности медного шибберного затвора в процессе взаимодействия со струей может как возрастать, так и уменьшаться в зависимости от принятого начального значения: 1 мм (кривая 1), 3,6 мм (кривая 2), 6 мм (кривая 3). Толщина корки приближается к некоторому равновесному значению, которое зависит от условий теплообмена со стороны струи металла.

На рисунке 3 приведены расчетные данные по температуре плиты шибберного затвора в процессе перекрытия канала для плиты толщиной 50 мм при скорости пе-

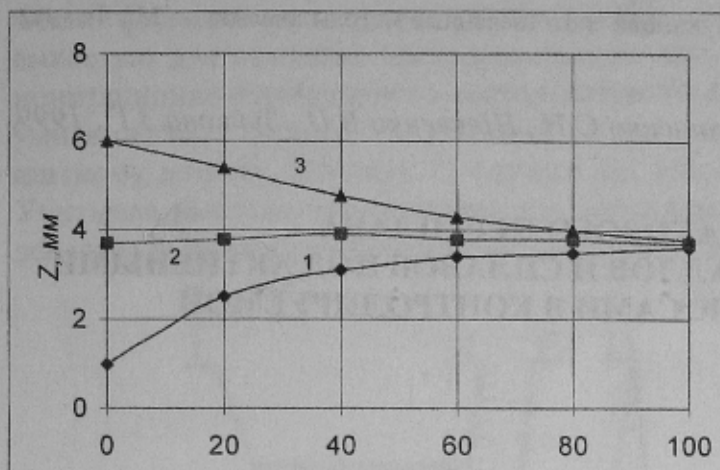


Рисунок 2 — Эволюция толщины корки (Z) в процессе перекрытия канала

ремещения 0,1 м/с и равновесной толщине корки 3,6 мм. Кривые 1 и 2 соответствуют неохлаждаемой плите с коркой и без корки, кривая 3 — охлаждаемой плите с коркой. Согласно этим данным, корка металла выполняет защитную функцию, снижая температуру плиты шибера затвора на 700–800°C. С увеличением скорости плиты влияние корки снижается.

Влияние водяного охлаждения плиты на ее тепловое состояние в процессе перекрытия канала невелико ввиду скоротечности процесса и тепловой инерции (рисунок 3). Однако после перекрытия канала роль охлаждения плиты становится решающей. На рисунке 4 приведены расчетные данные по тепловому состоянию плиты шибера затвора толщиной 50 мм в рабочем цикле устройства донного выпуска стали при скорости перекрытия 0,5 м/с. Кривая 1 относится к неохлаждаемой плите, кривые 2 и 3 соответствуют охлаждению водой с коэффициентом теплоотдачи 5000 и 10000 Вт/м²·К.

Однако после перекрытия канала роль охлаждения плиты становится решающей. На рисунке 4 приведены расчетные данные по тепловому состоянию плиты шибера затвора толщиной 50 мм в рабочем цикле устройства донного выпуска стали при скорости перекрытия 0,5 м/с. Кривая 1 относится к неохлаждаемой плите, кривые 2 и 3 соответствуют охлаждению водой с коэффициентом теплоотдачи 5000 и 10000 Вт/м²·К.

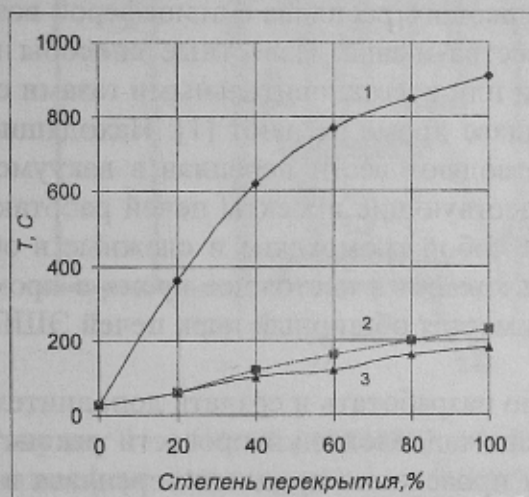


Рисунок 3 — Изменение температуры плиты шибера (T) в процессе перекрытия.

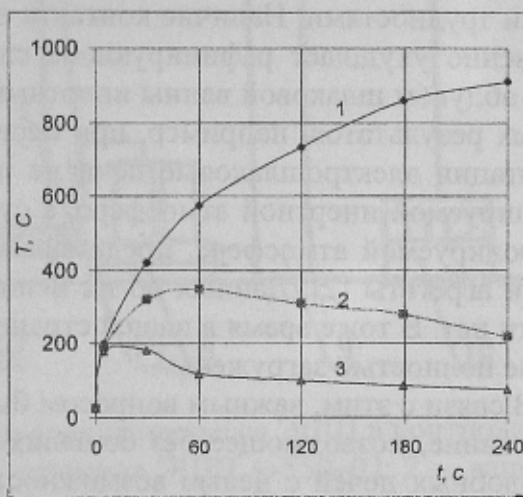


Рисунок 4 — Изменение температуры плиты шибера (T) по ходу рабочего цикла устройства выпуска стали (t).

В результате выполненных исследований получены предварительные данные о тепловой работе медного шибера водоохлаждаемого затвора, которые необходимы для проектирования экспериментальных образцов устройства выпуска стали.

Список литературы

1. Comelt- a new generation of electric arc furnace/ Mc Alvon T. // Iron and steelmaker, 1994 — v.21, — № 10. — Р. 63–66.
2. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газожидкостных систем. — М.: Госэнергоиздат, 1958. — 232с.

3. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа — М.: Физматгиз, 1962. — 367с.

© Тищенко П.И., Тимошенко С.Н., Шевченко В.П., Зуйкова З.Г., 1999.

УСТАНОВКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА ВЫСОКОРЕАКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПОД АКТИВНЫМИ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИМИ ФЛЮСАМИ В КОНТРОЛИРУЕМОЙ АТМОСФЕРЕ ИЛИ ВАКУУМЕ

РЯБЦЕВ А.Д. (ДонГТУ)

Существующие стандартные промышленные печи электрошлакового переплава невозможно использовать для выплавки качественных слитков высокорреакционных металлов (хром, титан, ванадий) методом электрошлакового переплава под активными кальцийсодержащими шлаками. Поэтому была разработана и изготовлена установка, позволяющая вести электрошлаковый переплав в контролируемой атмосфере или вакууме, которая описана ниже.

Использование глубоко раскисленных шлаковых систем типа металлический кальций-фторид кальция при электрошлаковом переплаве (ЭШП) связано с определенными трудностями. Наличие контакта шлакового расплава с атмосферой воздуха существенно ухудшает рафинирующие свойства шлака. Известные способы переплава с обдувом шлаковой ванны инертными или восстановительными газами существенных результатов, например, при переплаве хрома не дают [1]. Находящиеся в эксплуатации электрошлаковые печи не позволяют вести переплав в вакууме или контролируемой инертной атмосфере, а существующие проекты печей работающих в контролируемой атмосфере, представляют собой громоздкие и сложные в обслуживании агрегаты [2]. Данных об их использовании в настоящее время в промышленности нет. В тоже время в нашей стране имеется обширный парк печей ЭШП, которые не полностью загружены.

В связи с этим, важным вопросом было разработать и создать дополнительное оборудование, позволяющее без больших капиталовложений провести реконструкцию подобных печей с целью возможности проведения процесса переплава в контролируемой атмосфере. Для отработки необходимых узлов реконструируемых печей ЭШП и разработки в опытно промышленных условиях технологии переплава высокорреакционных металлов и сплавов на таких печах, была создано дополнительное оборудование к установке А-550-02, позволяющее вести переплав в контролируемой атмосфере или вакууме, а также проводить исследования физико-химических процессов, протекающих в системе газ-шлак-металл при ЭШП. Схема установки показана на рисунке 1.

Принцип работы ее заключается в следующем: переплавляемый электрод 4 крепится к электрододержателю 3, который одновременно служит токоподводом. Переплав ведется в кристаллизатор 5, расположенный на поддоне 6. Для создания в плавильном пространстве контролируемой атмосферы или вакуума применен защитный кожух 2. Кожух снабжен смотровым окном 7, для визуального контроля процесса переплава. Вакуум создается форвакуумным насосом 8 типа 2НВР-5ДМ. Между насосом и печью расположена ловушка-фильтр 14, которая служит одновре-