

УДК 621.791.927.5

Цветков А. И., Макаренко Н. А., Власов А. Ф., Титаренко К. Э.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ СТЕНКИ ТЕПЛООБМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ПРИМЕРЕ КРИСТАЛЛИЗАТОРА ЭШП

Определение температурного режима сварки кристаллизатора проводилось многими авторами [1, 2]. Полученные результаты в большинстве случаев трудно сопоставимы из-за режима переплава, типа кристаллизатора, толщины стенки кокиля, системы охлаждения, расхода охлаждающей воды и т. п.

Целью настоящей работы является определение расчетным и экспериментальным путями температуры стенки малогабаритного кристаллизатора, применяемого для переплава отходов быстрорежущих сталей. Полученные результаты позволят оптимизировать величину отводимого теплового потока при максимально допустимых электрических параметрах процесса переплава.

Для решения поставленной задачи необходимо знать следующие величины: среднюю тепловую нагрузку на стенку кристаллизатора, температуру внутренней и наружной поверхностей кокиля, температуру жидкого шлака, глубину шлаковой ванны, толщину гарнисажа, коэффициент теплоотдачи от стенки к воде и ряд других величин. Чтобы получить их численные значения выполнялись опытные плавки. Для экспериментальных работ использовался кристаллизатор закрытого типа (рис. 1), кокиль 1 которого изготовлен из цельнотянутой трубы с внутренним диаметром 100 мм и толщиной сетки 10 мм из меди М1.

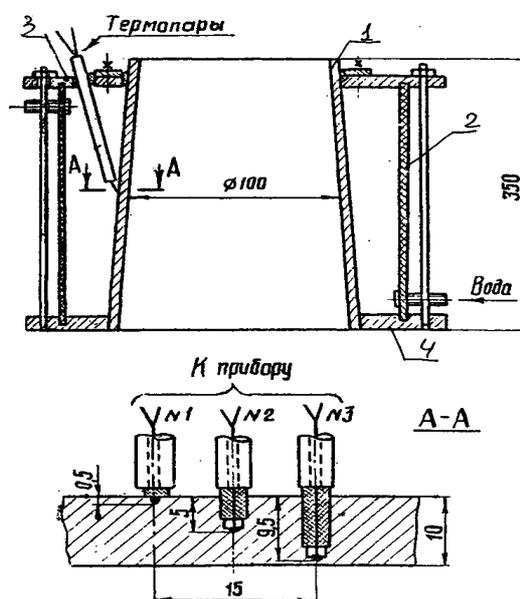


Рис. 1. Схема экспериментального кристаллизатора и установки термопар

С целью наблюдения за циркуляцией воды в процессе плавки кожух кристаллизатора 2 изготавливали из оргстекла, а другие элементы – из стали Ст 3. Измерение температуры в стенке кокиля проводили хромель-алюминиевыми термопарами диаметром 0,2 мм, зачеканенными в стенку на различную глубину на высоте 200 мм от донной части кокиля, допуская, что процесс электрошлакового переплава в данной зоне полностью стабилизировался и тепловой поток, воспринимаемый стенкой кокиля, является постоянным. Для регистрации

температуры охлаждающей воды на входном и выходном патрубках имелись штуцеры, предназначенные для установки ртутных термометров с ценой деления 0,1 °С. Расход воды определялся с помощью расходомера типа ВКОС-20.

Изменение ЭДС в зависимости от температуры записывалось с помощью пятиканального самопишущего прибора Н-327-5. Градировка термопар проводилась по образцовой термопаре при температуре 50–500 °С с интервалом через 50 °С. Прохождение шлаковой ванны через исследуемое сечение фиксировалось датчиком, вмонтированным в стенку кокиля на уровне установленных термопар. При срабатывании датчика на ленте самописца делалась отметка, которая при расшифровке записи ЭДС позволяет установить температуру стенки в зоне шлаковой ванны. Переплавы производили на установке А-578. В качестве переплавляемого электрода использовался прокат из стали Ст 3 (диаметром 40 мм). Процесс велся на переменном токе с использованием флюса АНФ-6. Ток и напряжение фиксировался самопишущими приборами Н-376, глубина шлаковой ванны измерялась щупом с надставкой из вольфрама, температура жидкого шлака – вольфрам-ренийевой термопарой в чехле из карбонитрида бора. Проведено 5 плавок (примерно на одном и том же режиме): среднее значение тока перепада – 1400 А; среднее значение напряжения – 40 В. Температура охлаждающей воды на входе – 16 °С, на выходе – 34 °С. Расход воды составлял 0,42 кг/с, среднее значение на уровне термопар глубины шлаковой ванны – 40 мм, толщина гарнисажа – 1,5 мм. Среднее значение температуры жидкого шлака – 680 °С.

Известно, что при решении задач по определению температурных полей в стенке решается или дифференциальное уравнение теплопроводности, или используется закон Фурье, позволяющий рассчитать температуру стенки по тепловому потоку [3, 4]. Возможность определения численного значения величины теплового потока при ЭСП по известным формулам [3, 4] и экспериментальным данным с достаточной точностью позволяет считать последний способ более приемлемым при решении частной задачи. При выполнении расчетов принимали следующие допущения:

1. Процесс распространения тепла в кокиле от воздействия теплового потока рассматривали как в плоской стенке, так как радиус его кривизны значительно больше толщины стенки [5].

2. В виду того, что скорость заполнения кристаллизаторов в процессе перепада сравнительно невелика, температурный режим в области шлаковой ванны принимается стационарным.

3. Систему «жидкий шлак – гарнисаж – стенка кокиля – охлаждающая вода» можно рассматривать как многослойную стенку, находящуюся в стационарном режиме (рис. 2).

4. Известно, что при стационарном режиме передаваемый тепловой поток постоянен и для всех слоев одинаков [5]. Для принятой схемы это имеет вид:

$$q = \frac{(t_3 - t_1)l_{\Gamma}}{d_n}; \quad (1)$$

$$q = \frac{(t_1 - t_2)l_{cm}}{d_n}, \quad (2)$$

где t_1 – температура стенки со стороны плавильного пространства, °С;

t_2 – температура стенки со стороны охлаждающей воды, °С;

t_3 – температура жидкого шлака, °С;

λ_{Γ} – теплопроводность гарнисажа, (1,95 Вт/(м град) [6];

λ_{cm} – теплопроводность медной стенки, (379 Вт/(м град)) [7];

δ_{Γ} – толщина шлакового гарнисажа, м;

δ_{cm} – толщина стенки кокиля, м.

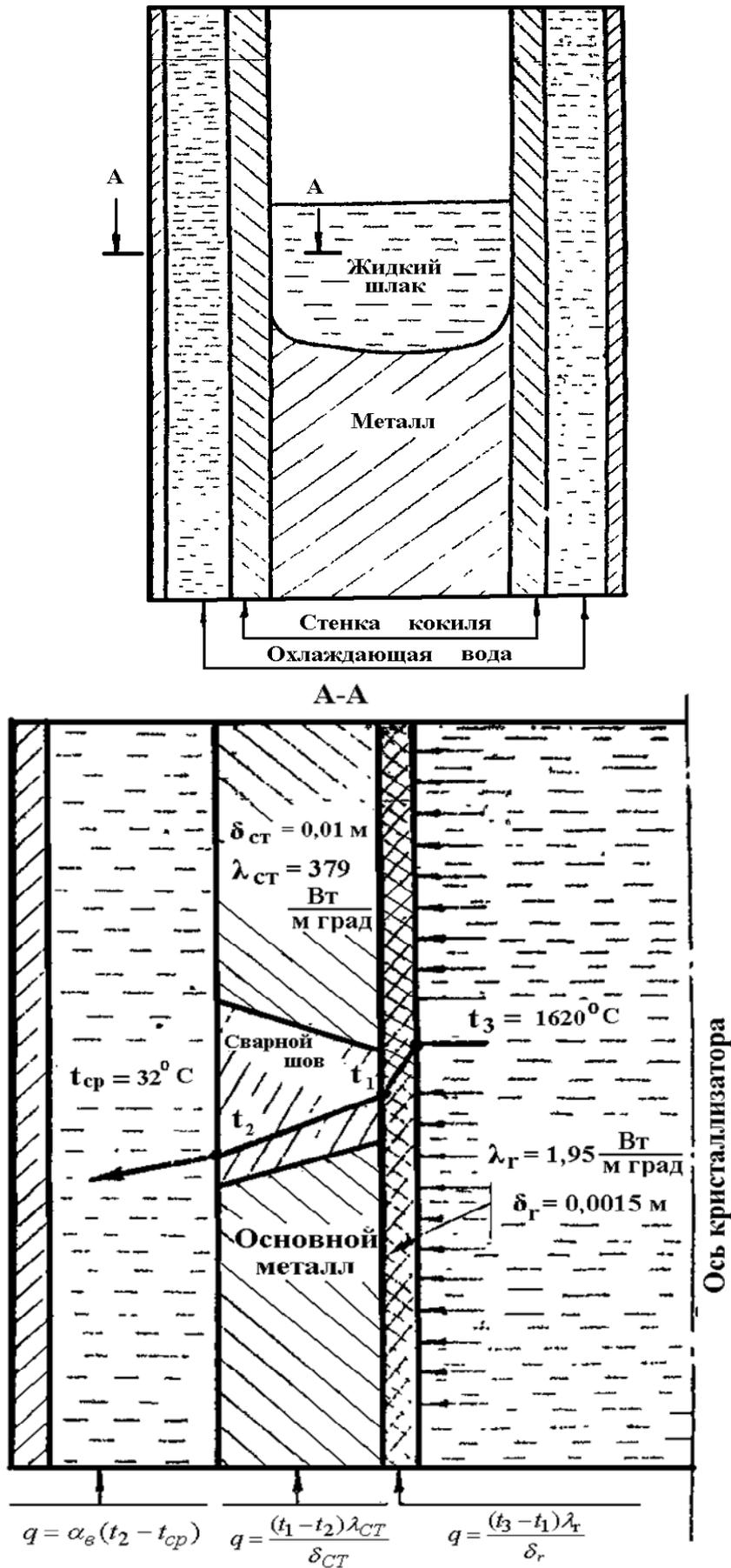


Рис. 2. Схема многослойной наплавки

Тепловой поток от жидкого шлака к стенке кристаллизатора передается в результате совокупного действия конвекции, теплопроводности и лучеиспускания (это так называемый сложный теплообмен) [5]. В виду того, что разделить систему теплопередачи на отдельные составляющие представляет значительные трудности, при практических расчетах отдается предпочтение одному из преобладающих факторов. В данном случае допускается, что теплопередача осуществляется в основном за счет теплопроводности. Данное допущение подтверждается предварительными расчетами лучистого теплообмена (наиболее вероятного в данном случае) между гарнисажом и стенкой кристаллизатора по известному закону Стефана-Больцмана (при этом погрешность расчета составляла 5–7 %). Однако, если учитывать влияние лучеиспускания, в расчетную схему необходимо ввести дополнительные элементы, которые увеличивают термическое сопротивление системы, а, следовательно, и уменьшают тепловой поток, воспринимаемый стенкой, т. е. принятая схема расчета (рис. 2) воспроизводит более жесткие условия теплообмена по сравнению с реально существующими. Средний тепловой поток, передаваемый от жидкого шлака к стенке кристаллизатора, находился из выражения [4]:

$$q = \frac{0,5IU}{F_{ун}}, \quad (3)$$

где 0,5 – коэффициент, учитывающий количество тепла, отводимого через стенку в зоне шлаковой ванны;

I, U – ток и напряжение переплава;

$F_{ун}$ – площадь, через которую передается тепловой поток от шлака к воде, м^2 .

$$F_{ун} = 0,04 \times 3,14 \times 0,12 = 0,015 \text{ м}^2; \quad (4)$$
$$q = 1,86 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Температура стенки со стороны жидкого шлака рассчитывается по формуле (1):

$$t_1 = t_3 - \frac{qd_r}{a} = 1620 - \frac{186 \times 10^6 \times 0,0015}{1,95} = 189 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (5)$$

При этом коэффициент теплоотдачи от жидкого шлака к стенке составляет:

$$a_{ун-см} = \frac{a_r}{d_r} = \frac{1,95}{0,0015} = 1300 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}. \quad (6)$$

Температура стенки (t_2) со стороны охлаждающей воды определяется из выражения (2):

$$t_2 = t_1 - \frac{qd_{cm}}{I_{cm}} = 189 - \frac{1,86 \times 10^6 \times 0,01}{379} = 140 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Экспериментально измеренные значения температур на внутренней и наружной поверхностях составляют соответственно 186 и 134 $^\circ\text{C}$.

При температуре охлаждаемой поверхности 134–140 $^\circ\text{C}$ теплоотвод осуществляется в режиме пузырькового кипения, который, как известно, обеспечивает высокую интенсивность теплоотдачи [1]. Это подтверждается и наблюдениями процесса циркуляции воды через прозрачный кожух. При стабилизации процесса в зоне шлаковой и металлической ванны на наружной поверхности кокиля кристаллизатора наблюдалось интенсивное образование паровых пузырьков, которые захватываются циркулирующей водой.

Изменяя величину отводимого теплового потока, возможно воздействовать на температурный режим струи. При увеличении теплового потока до величины равной $2,5 \cdot 10^6$ Вт/м² наблюдается образование паровой подушки на отдельных участках теплоотводящей поверхности, что способствует значительному повышению температуры стенки и возможному ее прогоранию.

На температурное состояние теплопередающей стенки значительное влияние оказывает коэффициент теплоотдачи α_B от стенки к воде, определяемый из выражения:

$$q = \alpha_B (t_2 - t_{CP}),$$

где t_{CP} – средняя температура охлаждающей воды, которая рассчитывается по формуле:

$$t_{CB} = t_{BX} + \frac{0,5I \times U}{G \times c}; \quad (8)$$

$$\alpha_{BX} = \frac{1,86 - 10^6}{140 - 32} = 17222 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}), \quad (9)$$

где t_{BX} – температура воды на выходе, °С;

G – расход воды, определяемый по выбранной скорости и площади сечения охлаждающей рубашки, кг/с;

c – теплоемкость воды, 4186,8 Дж/(кг·град).

Средний расход воды при выполнении экспериментальных плавков составлял 0,42 кг/с.

Исследования показали, что изменяя расход воды и поддерживая температуру стенки кокиля на максимально возможном уровне, обеспечивающем режим пузырькового кипения, возможно в значительной мере обеспечить повышение теплового режима процесса ЭШП, и достигнуть необходимую работоспособность конструкции кристаллизатора.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что температурный режим теплопередающей стенки кристаллизатора определяется не только величиной отводимого теплового потока, но и коэффициентом теплоотдачи от стенки к воде.

2. Определено, что повышение температурного режима стенки при условии сохранения ее эксплуатационной стойкости позволит повысить электрические параметры электрошлакового процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медовар Б. И. *Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве* / Б. И. Медовар и др. – К. : Наук. думка, 1978. – 303 с.
2. Цикерман А. Л. *Температурные условия работы стального кристаллизатора вакуумных дуговых печей* / А. Л. Цикерман и др. // Научн. Тр. ВНИИЭТО. – М. – Вып. 3. – С. 54–60.
3. Шевцов В. Л. *Методика расчета кристаллизаторов ЭШП, охлаждаемых в режиме кипения* / В. Л. Шевцов, Г. С. Маринский, В. А. Ковалев // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1976. – Вып. 4. – С. 53–56.
4. Шевцов В. А. *Методика расчета системы охлаждения конвективных кристаллизаторов ЭШП* / В. А. Шевцов // Рафинирующие переплавы. – К. : Наук. думка. – 1974. – С. 40–45.
5. Михеев М. А. *Основы теплопередачи* / М. А. Михеев. – М. - Л. : Госэнергоиздат, 1956. – 392 с.
6. Каменский Ю. М. *Тепловая стабильность шлаковой ванны и структура ее пограничного слоя. Ч. 1.* / Ю. М. Каменский и др. // Специальная электрометаллургия. – К. : Наук. думка, 1972. – С. 24–33.
7. Чиркин В. С. *Теплопроводность промышленных материалов* / В. С. Чиркин. – М. : Машигиз, 1962. – 247 с.