

УДК 669.14.1

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СТАТЕЙ БАЛАНСА ТЕПЛОТЫ В ЗАГОТОВКЕ, ОТЛИВАЕМОЙ НА МНЛЗ

Кабаков З.К., Грибкова Ю.В., Габелая Д.И.

Череповецкий государственный университет, Череповец, e-mail: mt@chsu.ru, 150475@mail.ru

Разработка методики оценки статей баланса теплоты в заготовке, отливается на МНЛЗ. З.К. Кабаков, Ю.В. Грибкова, Д.И. Габелая. В статье изложена методика расчета статей баланса теплоты, теряемой слябовой заготовкой на машине непрерывного литья, с использованием математической модели затвердевания и охлаждения заготовки на МНЛЗ. Анализ статей баланса позволяет определить возможности утилизации тепла на различных участках следования заготовки. Методику предполагается использовать для оценки потерь тепла в ЗВО, кристаллизаторе и на воздухе в зависимости от различных параметров технологии разлива и для разработки мероприятий по энергосбережению на различных участках охлаждения заготовки. В качестве иллюстрации предложенной методики в статье приведен пример расчета долей теплоты, ушедшей от сляба в зоне кристаллизатора и в ЗВО. Разработанные методики расчета баланса позволяют оценить максимальное количество теплоты заготовки, поступающей на холодный склад сталеплавильного производства, и экономическую эффективность разработки способов энергосбережения на складе.

Ключевые слова: баланс теплоты, математическая модель, охлаждение, сляб, утилизация, количество теплоты

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF BALANCE SHEET ITEMS OF HEAT IN THE WORKPIECE CAST IN CCM

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

Cherepovets State University, Cherepovets, e-mail: 150475@mail.ru

The article sets out the methodology of calculation of the balance sheet items of heat lost by the blank slab at the continuous casting machine, using a mathematical model of solidification and cooling of the workpiece on the caster. Analysis of balance sheet items to determine the possibility of heat recovery at different sites following harvesting. The procedure to be used for estimating the loss of heat in the secondary cooling zone, mold and air depending on various parameters of casting technology and for the development of energy-saving measures in different parts of the preform cooling. As an illustration of the proposed method in the article is an example of calculating the share of heat from a bygone slab in the area of mold and secondary cooling zone. The method of calculation of balance allow us to estimate the maximum amount of heat the workpiece entering the cold storage steel production and economic efficiency of energy-saving techniques in stock.

Keywords: the balance of warmth, a mathematical model, cooling, slab utilization, the amount of heat

После выхода заготовки из роликовой проводки МНЛЗ осуществляется её порезка на слябы мерной длины. Слябы с каждого ручья складываются в пачку из двух слябов и подаются на рольганг-тележку. Затем слябы передаются на приемно-транспортный рольганг склада слябов. Перед контролем качества поверхности слябов, отлитых на машинах непрерывного литья, слябы охлаждаются в штабелях. При этом теряется значительное количество тепла. Для разработки мероприятий по утилизации теплоты на холодном складе необходимо выполнить расчет баланса теплоты на технологической линии МНЛЗ. С этой целью в данной работе использовали математическую модель затвердевания и охлаждения заготовки [1]. Эту модель дополнили расчетом величин Q_0 , $Q_{кр}$, $Q_{ЗВО}$ – количества тепла, поступившего в заготовку и ушедшего с поверхности в районе кристаллизатора и ЗВО, соответственно, по формулам:

$$Q_0 = v \cdot A \cdot B \cdot \rho \cdot [c(T_0 - T_{cp}) + L]; \quad (1)$$

$$Q_{кр} = 2 \left[\int_0^{H_a} \int_0^B q_y dx dz + \int_0^{H_a} \int_0^A q_{ш} dy dz \right]; \quad (2)$$

$$Q_{ЗВО} = 2 \left[\int_{H_a}^{h_{ЗВО}} \int_0^B q_y dx dz + \int_{H_a}^{h_{ЗВО}} \int_0^A q_{ш} dy dz \right]. \quad (3)$$

Уравнение баланса теплоты в заготовке

$$\eta_{ЗВО} = \frac{Q_{ЗВО}}{Q_0} \cdot 100\%; \text{ имеет вид:}$$

$$Q_0 = Q_{кр} + Q_{ЗВО} + Q_{возд}.$$

Это уравнение можно использовать для определения количества тепла, ушедшего от сляба при охлаждении на воздухе, $Q_{возд}$:

$$Q_{возд} = Q_0 - Q_{кр} - Q_{ЗВО}.$$

Обозначим доли приведенных статей баланса следующим образом:

$$\eta_{кр} = \frac{Q_{кр}}{Q_0} \cdot 100\%;$$

$$\eta_{\text{возд}} = \frac{Q_0 - Q_{\text{кр}} - Q_{\text{ЗВО}}}{Q_0} \cdot 100\% = 100\% - \eta_{\text{кр}} - \eta_{\text{ЗВО}};$$

$$\eta_{\text{возд}} = 100\% - \eta_{\text{кр}} - \eta_{\text{ЗВО}}.$$

В формулах (1)–(3) приняты обозначения: T_0 – температура металла, поступающего в кристаллизатор; v – скорость разливки; ρ – плотность стали; c – теплоемкость стали; A, B – ширина и толщина сляба; $T_{\text{ср}}$ – температура среды; $q_y, q_{\text{ш}}$ – удельные количества тепла с узкой и широкой граней слитка; L – теплота кристаллизации стали.

В данной работе на основе приближенного аналитического решения задачи затвердевания слябовой заготовки [1] разработали также инженерную методику расчета статей баланса теплоты в заготовке.

Методика включает последовательное определение следующих величин: время пребывания сечения заготовки в кристаллизаторе:

$$t_{\text{кр}} = \frac{H_a}{v};$$

перегрев жидкой стали:

$$\Delta T_{\text{п}} = T_0 - T_{\text{кр}};$$

эффективная теплота кристаллизации:

$$L^* = L + c \cdot \Delta T_{\text{п}};$$

коэффициент температуропроводности стали:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho};$$

критерий и коэффициент затвердевания заготовки в кристаллизаторе ($i = 1$) и в ЗВО ($i = 2$), соответственно:

$$K_i = \frac{L^*}{c(T_{\text{кр}} - T_{\text{п}i})};$$

$$k_i = \sqrt{\frac{4a}{1 + 2K_i}};$$

$$Q_{\text{ЗВО}} = 2 \left(\lambda \cdot v \cdot \Pi \cdot \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{п}2}}{k_1} \right) \cdot \left[\sqrt{\frac{H_{\text{ЗВО}}}{v} - \frac{H_a}{v} \left(1 - \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^2 \right)} - \frac{k_1}{k_2} \cdot \sqrt{\frac{H_a}{v}} \right].$$

толщина корки на выходе из кристаллизатора:

$$\varepsilon_1 = k_1 \cdot \sqrt{t_{\text{кр}}};$$

продолжительность затвердевания заготовки:

$$t_{\text{затв}} = t_{\text{кр}} + \frac{S^2 - \varepsilon_1^2}{k_2^2};$$

глубина жидкой фазы в затвердевающей заготовке:

$$L_{\text{жф}} = t_{\text{затв}} \cdot v;$$

коэффициент теплоотдачи излучением от поверхности заготовки:

$$\alpha_{\text{л}} = \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{с}} \cdot (T_{\text{п}2}^2 + T_{\text{ср}}^2) \cdot (T_{\text{п}2} + T_{\text{ср}});$$

коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции воздуха:

$$\alpha_{\text{к}} = k \cdot \sqrt[4]{T_{\text{п}2} - T_{\text{ср}}};$$

критическое значение α^* (или коэффициент теплоотдачи в конце ЗВО):

$$\alpha^* = \alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{к}} + \Delta\alpha;$$

толщина корки заготовки на выходе из ЗВО:

$$\varepsilon_{\text{ЗВО}} = \frac{\lambda(T_{\text{кр}} - T_{\text{п}2})}{\alpha^* \cdot (T_{\text{п}2} - T_{\text{ср}})};$$

момент времени, соответствующий выходу заготовки из ЗВО:

$$t_{\text{ЗВО}} = t_{\text{кр}} + \frac{\varepsilon_{\text{ЗВО}}^2 - \varepsilon_{\text{кр}}^2}{k_2^2};$$

расстояние от мениска до выхода из ЗВО:

$$h_{\text{ЗВО}} = t_{\text{ЗВО}} \cdot v,$$

если $h_{\text{ЗВО}} > L_{\text{жф}}$, то $h_{\text{ЗВО}} = L_{\text{жф}}$;

длина ЗВО:

$$H_{\text{ЗВО}} = h_{\text{ЗВО}} - H_a.$$

Количество теплоты, ушедшее от заготовки в кристаллизаторе:

$$Q_{\text{кр}} = 2 \left(\lambda \cdot v \cdot \Pi \cdot \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{п}1}}{k_1} \right) \cdot \sqrt{\frac{H_a}{v}}.$$

Количество теплоты, ушедшей в ЗВО:

Статьи баланса теплоты, отводимой от заготовки в разных зонах МНЛЗ

Участки охлаждения заготовки	Скорость разливки							
	0,8 м/мин				1,2 м/мин			
	Расчет по модели		Инженерная методика		Расчет по модели		Инженерная методика	
Q, МВт	Доля, %	Q, МВт	Доля, %	Q, МВт	Доля, %	Q, МВт	Доля, %	
Кристаллизатор	2,78	7	2,7	6,67	3,00	5,1	3,3	5,4
ЗВО	11	28	11,7	28,9	20,00	33,9	19,5	31,5
На воздухе	25,99	65	26,1	64,43	36,00	61	39,2	63,1
Итого		100		100		100		100

Количество поступившей в заготовку теплоты и доли теплоты определяются по вышеприведенным формулам. Здесь: λ – теплопроводность стали; T_{n1} , T_{n2} – температуры поверхности в районе кристаллизатора и ЗВО, соответственно; H_a – длина активной части кристаллизатора (от мениска до нижнего края кристаллизатора); $H_{зво}$ – длина ЗВО.

Математическую модель и инженерную методику расчета использовали для определения долей теплоты, отводимых от слэбовых заготовок в разных зонах МНЛЗ для различных скоростей разливки. Моделирование и расчеты выполнены для размеров слэба 1,2×0,25 м и при скоростях разливки 0,8 м/мин и 1,2 м/мин. Результаты расчета статей баланса представлены в таблице.

Как следует из таблицы, доли тепла, отводимого в кристаллизаторе и зоне охлаждения на воздухе, уменьшаются при увеличении скорости вытягивания. Доля тепла в ЗВО при увеличении скорости, наоборот,

увеличивается. Различие результатов прогноза статей баланса по инженерной методике по сравнению с точной методикой не превысила 3%. Полученные данные хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований [2].

Таким образом, разработанные методики расчета баланса позволяют оценить максимальное количество теплоты заготовки, поступающей на холодный склад сталеплавильного производства, и экономическую эффективность разработки способов энергосбережения на складе.

Список литературы

1. Кабаков З.К. Математическая модель затвердевания и охлаждения непрерывного слитка прямоугольного сечения / З.К. Кабаков, Д.И. Габелая // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: материалы II международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – С. 131–133.
2. Рутес В.С. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, В.И. Аскольдов, Д.П. Евтеев, В.Я. Генкин, М.Г. Чигринов, А.И. Манохин – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.