

РАСЧЕТ БАЛАНСА ТЕПЛОТЫ В ШАХТЕ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ФУКСА

В статье представлена методика расчета статей теплового баланса теплоты в шахте дуговой сталеплавильной печи Фукса с использованием математической модели конвективного теплообмена в слое шихты. Методику предполагается использовать для повышения эффективности использования теплоты отходящих из печи горячих газов.

Дуговая сталеплавильная печь Фукса, шахта, шихта, методика расчета баланса теплоты, математическая модель конвективного теплообмена в слое шихты.

The paper presents the technique of the articles of the thermal balance of heat in the shaft of the electric arc furnace Fuchs using the mathematical model of convective heat transfer in the layer of the charge. The methodology will be used to increase the utilization of heat from exhaust of hot gases from the furnace.

Fuchs electric arc furnace, shaft, charge, method of calculating the balance of heat, mathematical model of convective heat transfer in the layer of the charge.

Введение.

Одним из направлений развития сталеплавильного производства является повышение производительности сталеплавильных агрегатов, в которых в качестве шихты используется стальной лом. Для этого стальной лом перед загрузкой в печь подогревают. Для подогрева лома в дуговой сталеплавильной печи конструкции фирмы Фукс (далее – печь Фукса) используют теплоту отходящих из рабочего пространства печи газов. Особенностью этой печи является наличие специальной шахты, расположенной над частью рабочего пространства (рис. 1).

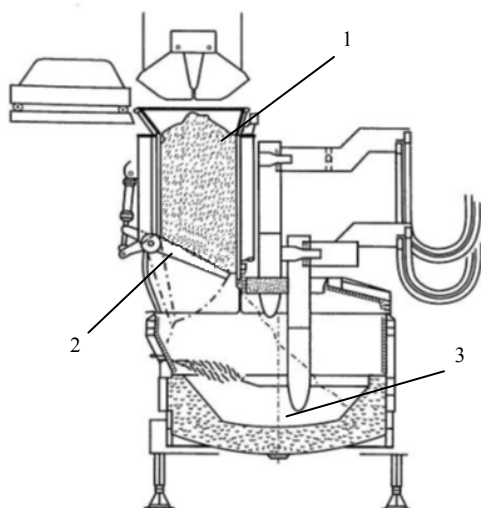


Рис. 1. Шахтная дуговая печь с удерживающими пальцами
1 – водоохлаждаемая шахта электропечи;
2 – удерживающие «пальцы»; 3 – ванна электропечи

В нижней части шахты располагают водоохлаждаемые «пальцы», которые перекрывают низ шахты и удерживают металлическую шихту при загрузке и подогреве ее. Между пальцами имеются щели, через которые засасывается горячий газ из рабочего про-

странства печи в шахту. Приходя через металлолом, газы отдают часть теплоты и уходят в газоочистительный тракт. Часть теплоты газов теряется также на нагрев воды, используемой для охлаждения пальцев и металлических стен шахты. После заливки жидкого чугуна пальцы опускаются, и подогретый лом сыпается из шахты на подину печи.

Основная часть.

В данной работе для совершенствования тепловой работы шахты разработана методика расчета теплового баланса шахты для произвольного момента времени нагрева лома.

На рис. 2 показана схема потоков теплоты в шахте.

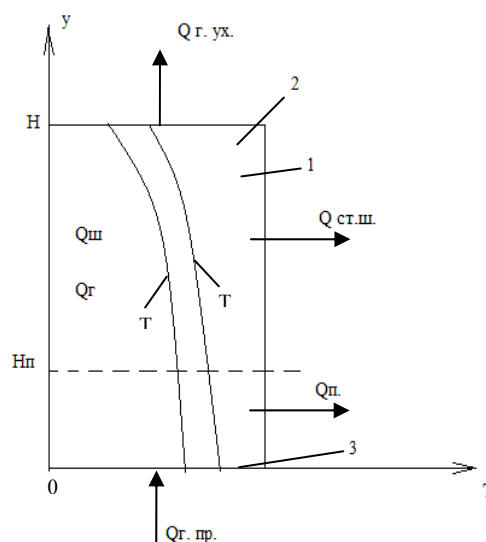


Рис. 2. Схема потоков теплоты в шахте
1 – стенки шахты; 2 – металлолом;
3 – область удерживающих пальцев

Считаем, что теплота $Q_{г.пр.}$ поступает в шахту с газом из печного пространства за время t . Часть этой теплоты нагревает шихту $Q_{ш}$ и газ, находящийся в шахте с ломом Q_z . Другая часть уходит с газом через шахту $Q_{г.ух.}$ и с водой, охлаждающей шахту $Q_{ст.ш.}$ и удерживающие пальцы Q_n за время t . Методика включает уравнение теплового баланса:

$$Q_{г.пр.} = Q_{ш} + Q_{г.ух.} + Q_z + Q_n + Q_{ст.ш.} \quad (1)$$

Определим все указанные статьи баланса теплоты:

$$Q_{г.пр.} = \int_0^t \int_0^a \int_0^b c_g \cdot \rho_g \cdot W \cdot (T_{г.пр} - T_{ш0}) dx dz = a \cdot b \cdot c_g \cdot \rho_g \cdot W \cdot (T_{г.пр} - T_{ш0}) t, \quad (2)$$

$$Q_{ш} = \int_0^a \int_0^b \int_0^H c_{ш} \cdot \rho_{ш} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot (T_{ш} - T_{ш0}) dx dy dz = a \cdot b \cdot c_{ш} \cdot \rho_{ш} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \int_0^H (T_{ш} - T_{ш0}) dy, \quad (3)$$

$$Q_g = \int_0^a \int_0^b \int_0^H c_g \cdot \rho_g \cdot (T_g - T_{ш0}) dx dy dz = a \cdot b \cdot \int_0^H c_g \cdot \rho_g \cdot (T_g - T_{ш0}) dy, \quad (4)$$

$$Q_{г.ух.} = \int_0^t \int_0^a \int_0^b c_g \cdot \rho_g \cdot W \cdot (T_{г.ух} - T_{ш0}) dx dz = a \cdot b \cdot c_g \cdot \rho_g \cdot W \cdot \int_0^t (T_{г.ух} - T_{ш0}) dt, \quad (5)$$

$$Q_{ст.ш.} = \int_0^t c_v \cdot \rho_v \cdot G_{в.ш.} \cdot (T_{ш2} - T_{ш1}) dt = c_v \cdot \rho_v \cdot G_{в.ш.} \cdot (T_{ш2} - T_{ш1}) t, \quad (6)$$

$$Q_n = \int_0^t c_v \cdot \rho_v \cdot G_{в.п.} \cdot (T_{п2} - T_{п1}) dt = c_v \cdot \rho_v \cdot G_{в.п.} \cdot (T_{п2} - T_{п1}) t, \quad (7)$$

где W – скорость газа, м/с; c_g, ρ_g – удельная теплоемкость и плотность газа; $T_{г.пр}$ – температура поступающих в шахту газов; $T_{ш0}$ – начальная температура шихты; t – текущее время; a и b – размеры поперечного сечения шахты; H – высота слоя шихты; $c_{ш}, \rho_{ш}$ – удельная теплоемкость и плотность лома; ε – порозность металлической шихты; $T_{ш} = f(t, y)$ – распределение температуры шихты по высоте шахты в момент времени t ; $T_g = g(t, y)$ – распределение температуры газа по высоте шахты в момент времени t ; $T_{г.ух.} = f(t, 0)$ – температура уходящего из шахты газа; $G_{в.ш.}$ и $G_{в.п.}$ – расход воды на шахту и пальцы; c_v и ρ_v – теплоемкость и плотность воды; $T_{ш1}$ и $T_{ш2}$ – температура воды на входе и выходе из стенок шахты; $T_{п1}$ и $T_{п2}$ – температура воды на входе и выходе из пальцев.

Полученные статьи прихода и расхода теплоты позволяют оценить коэффициент полезного использования (КПИ) тепла отходящих газов $\eta = \frac{Q_{ш} \cdot 100\%}{Q_{г.пр.}}$

и влияния параметров металлолома и шахты на КПИ шахты.

В формулах для определения статей баланса (2)–(7) входят нестационарные распределения температуры шихты и газа по высоте шахты, которые нахо-

дятся с помощью математической модели теплообмена в неподвижном слое при просасывании через него горячего газа [1]. Модель включает дифференциальные уравнения:

теплопереноса с газом:

$$W \rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial y} = -\alpha_v (T_g - T_{ш}) - f_1 - f_2 \quad (8)$$

нагрева шихты (лома):

$$\rho_{ш} (1 - \varepsilon) c_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial t} = \alpha (T_g - T_{ш}), \quad (9)$$

граничное условие для уравнения (8):

$$T_g(t, H) = T_{г0}, \quad (10)$$

и начальное условие для уравнения (9) при

$$0 \leq z \leq H : T_{ш}(t, z) = T_{ш0}. \quad (11)$$

В уравнениях (8)–(11) использованы дополнительные обозначения: f_1 – функции стока теплоты, с помощью которой учитывается потери теплоты газа к воде, охлаждающей стенки шахты; f_2 – функция стока теплоты, с помощью которой учитывается потери теплоты газа к воде, охлаждающей пальцы, α_v – коэффициент объемного теплообмена для крупных кусков шихты [2].

Функции стока определяются по формулам:

$$f_1 = \frac{G_{в.ш.} \cdot c_v \rho_v (T_{ш2} - T_{ш1})}{a \cdot b \cdot H}, \quad f_2 = \frac{G_{в.п.} \cdot c_v \rho_v (T_{п2} - T_{п1})}{a \cdot b \cdot H_n},$$

где H_n – высота пальцев.

Величина α_v определяется по формуле:

$$\alpha_v = 75,6 \cdot \frac{W^{0,9} \cdot (T_g + 273)^{0,3} \cdot d_3 \cdot M}{d_3^{0,75} \cdot 6(1 - \varepsilon)}, \quad (12)$$

где M – коэффициент, зависящий от равномерности распределения газов по сечению, T_g – температура газа, К; d_3 – типичный диаметр куска лома; ε – порозность слоя; W – скорость (расход) газа.

Система уравнений (8)–(11) решена методом конечных разностей. Алгоритм решения реализован с использованием алгоритмического языка ПАСКАЛЬ-7. В алгоритм вошли также формулы (1)–(7), представленные в конечно-разностном виде. Выполнено тестирование алгоритма решения путем сравнения с точным решением задачи Т. Шумана [2]. Удовлетворительное согласование экспериментальных и результатов моделирования по температуре отходящего газа и шихты в верхнем сечении шахты, а также по тепловым потокам к воде, охлаждающей пальцы и шахту, достигнуто при адаптации модели по эмпирическому коэффициенту M в формуле (12) для определения α_v .

Ниже приведены результаты расчета статей баланса в шахте печи Фукс с применением математической модели конвективного теплообмена в неподвижном слое шихты в шахте печи Фукса емкость 130 т стали. Моделирование выполнено для исходных данных, представленных в табл. 1.

На рис. 3 приведено изменение коэффициента полезного использования тепла отходящего газа (КПИ, %) от времени нагрева.

Как видно из рис. 3, КПИ отходящих газов уменьшается с течением времени, что связано с увеличением температуры газов, покидающих шахту, и соответствующего увеличения потерь теплоты с газом в процессе нагрева шихты.

В табл. 2 приведены результаты расчета средних относительных значений статей баланса теплоты в шахте за время нагрева шихты. Данные по теплоте газа в шахте не вошли в таблицу ввиду незначительности этих величин.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Обозначение	Наименование величины	Значение	Единицы измерения
$T_{г0}$	Температура газа на входе в шахту	900	°С
$T_{ш0}$	Начальная температура шихты	50	°С
H	Высота слоя в шахте	6	м
ε	Порозность слоя	0,9	-
d_s	Типичный размер кусков шихты	0,6	м
$\rho_{ш}$	Плотность шихты	7500	кг/м ³
$c_{ш}$	Теплоемкость шихты	530	Дж/(кг·К)
M	Коэффициент равномерности газов	0,04	-
W	Скорость фильтрации газа	14	м/с
tk	Продолжительность нагрева	720	мин.
c_g	Теплоемкость газа	460	Дж/(кг·К)
ρ_g	Плотность газа	0,5	кг/м ³
N	Количество узлов в расчетной области	10	-

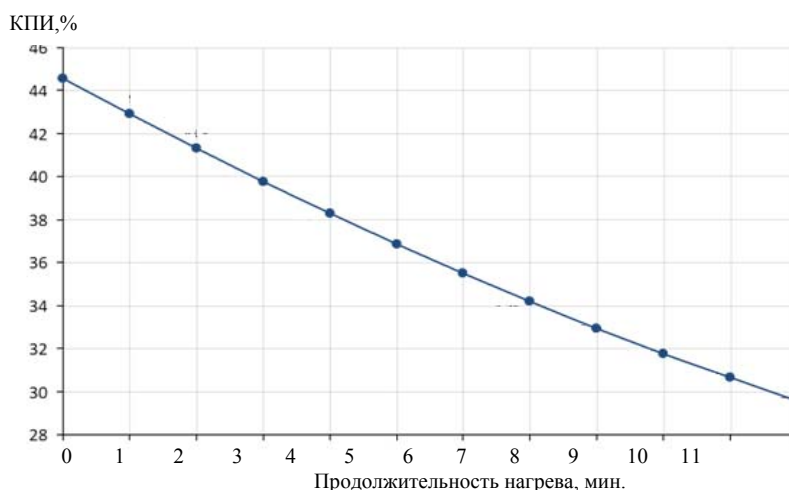


Рис. 3. Изменение КПИ шахты в процессе нагрева шихты

Таблица 2

Средние относительные значения статей баланса теплоты в шахте

Статьи баланса	Средние значения, %
Количество теплоты, поступившей с газами в шахту	100
Количество теплоты, ушедшей из шахты с газами	43
Количество теплоты в нагретой шихте	36
Количество теплоты, отведенной с водой для охлаждения стенок шахты	16
Количество теплоты, отведенной с водой для охлаждения пальцев	5

Как следует из табл. 2, значительное количество теплоты горячих газов из рабочего пространства печи (21 %) теряется с водой, поступающей на охлаждение стен шахты и удерживающих пальцев.

Выводы.

Таким образом, разработана методика расчета баланса теплоты в шахте печи Фукса с применением математической модели конвективного теплообмена в неподвижном слое шихты.

Методика может быть использована для совершенствования конструкции шахты и режимов нагрева шихты с целью повышения эффективности ис-

пользования теплоты отходящих из печи газов и производительности печи.

Литература

1. Кабаков, З. К. Математическая модель нагрева металлического лома в шахтной дуговой сталеплавильной печи Фукс / З. К. Кабаков, Р. С. Панков // Материалы Междунар. науч. семинара «Научно-технический прогресс в металлургии – 2012». – Череповец, 2013. – С. 24–28.
2. Китаев, Б. И. Теплотехнические расчеты металлургических печей / [Б. И. Китаев и др.]. – М., 1970.

УДК 62

А. Ю. Казинаускас, Е. В. Еришов
Череповецкий государственный университет

УПРАВЛЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ И НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

В статье приведено описание процесса и расчет параметров по нанесению покрытия на обрабатываемую деталь методами газотермического напыления, лазерной обработки и лазерной наплавки. Приведены режимы управления работой установки газотермического напыления для автоматизации технологического процесса, с целью восстановления деталей сложной геометрии.

Газотермическое напыление, лазерная наплавка, устройство управления, скоростью перемещения горелки, дистанции напыления.

The description of the process and calculation of parameters for covering on the processed detail by methods of gas-thermal dusting, laser processing and laser welding is given in the article. Control modes of installation of gas-thermal dusting for automatization of the technological process, for the purpose of restoration of details of difficult geometry are presented in the paper.

Gas-thermal dusting, laser welding, control unit, speed of movement of a torch, dusting distance.

Введение.

Важность решаемой задачи обусловлена востребованностью технических решений по восстановлению изношенных деталей оборудования, нанесению функциональных и защитных покрытий с использованием технологий газотермического напыления, лазерной обработки и лазерной наплавки. Нанесение на поверхность детали либо оборудования слоя металла, обладающего повышенной стойкостью к среде, твердостью, изолирующими и другими специальными свойствами, позволяет увеличить срок экс-

плуатации промышленного оборудования и его эксплуатационную надежность либо восстановить детали сложной геометрии.

Основная часть.

В настоящее время лазерная обработка и нанесение покрытия на деталь производится в ручном режиме при помощи сервопривода вращателя, который не обеспечивает требуемой точности и оперативности выполнения технологических операций (рис. 1) [2].

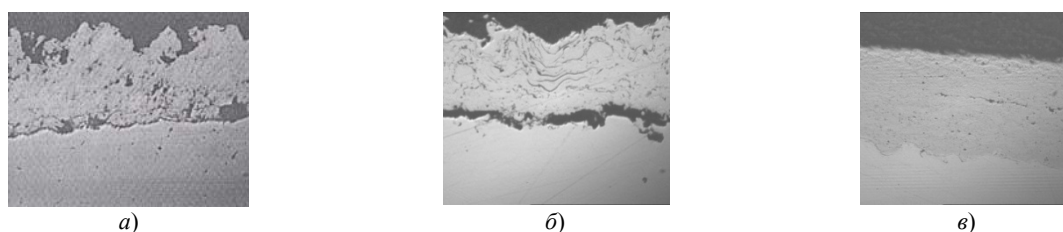


Рис. 1. Микроструктуры газотермических покрытий:

а – электродуговая металлизация, ручной режим; б – газопламенное напыление, ручной режим; в – метод высокоскоростного напыления при помощи роботизированного комплекса