

Литейное материаловедение, специальные способы литья

The original method of calculation of duration of burden heating till predetermined temperature is stated. The results of numerical modeling of nonstationary heating of fixed bed are given. Experimental check of the received results is carried out at full-scale plants.

С. Л. РОВИН, УП «ТЕХНОЛИТ», Л. Е. РОВИН, В. А. ЖАРАНОВ, ГГТУ им. П. О. Сухого

УДК 621.745:669.131

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ШИХТЫ

Предварительный нагрев шихты при плавке является эффективным средством повышения технико-экономических показателей работы электрических печей. Сокращение удельных затрат электроэнергии пропорционально зависит от температуры шихты, загружаемой в печь, достигая ~200 кВт·ч/т при нагреве до 600–650 °С.

Простой и технологически удобный способ подогрева шихты – использование автономных установок нагрева в специальных бадьях (корзинах) (рис. 1). Цикл нагрева составляет 10–15 мин, шихта загружается в печь без дополнительных перегрузочных операций, что значительно снижает потери тепла и трудоемкость процесса.

Продувка слоя кускового материала высокотемпературными газами за счет конвективного теплообмена позволяет обеспечить высокие скорости нагрева (при скоростях продувки 18–20 м/с объемный коэффициент теплообмена достигает 1,5–2,0 МВт/м³) при тепловом к. п. д. процесса до 60–80%, что характерно для продувки слоя при высоких температурных градиентах.

Эффективность установок определяется адекватным расчетом конструкции теплообменной части и продолжительности нагрева шихты до заданной температуры. Расчет параметров конструкции и времени нагрева предполагает созда-

ние математического описания теплофизических процессов, протекающих в слое нагреваемой шихты при прохождении потока газов.

Нагрев материалов в продуваемом слое кускового материала представляет собой сложный случай нестационарного теплообмена. Особенностью является сопряженный характер нестационарных температурных полей (в слое и потоке теплоносителя). Плотный слой образуется кусками различной формы и размеров, имеющими различные характеристики. Теплопроводность слоя $\lambda_{сл}$ зависит в меньшей степени от материала компонентов, чем от их укладки, форм кусков, порозности слоя и др., причем величина $\lambda_{сл}$ на 1–2 порядка ниже λ компонентов и изменяется (возрастает) в процессе нагрева.

Сложный характер движения и структуры слоя затрудняет определение реальной поверхности теплообмена. Физические параметры слоя (газопроницаемость, конфигурация и диаметр каналов, шероховатость поверхности дискретных элементов, удельная площадь поверхности и др.) значительно отличаются по высоте слоя и зависят от состава шихты. Соответственно меняются и параметры процесса передачи тепла конвекцией, которые являются функцией турбулентности и характерного размера тела (при внешней задаче). При



Рис. 1. Общий вид автономной установки высокотемпературного нагрева

расчете целесообразно одновременно учитывать оба вида теплообмена, но интенсивность передачи тепла теплопроводностью, как показывает практика, значительно ниже (более чем в 10 раз) скорости передачи тепла конвекцией.

Излучение не играет существенной роли в данных условиях: излучение газов из-за малости размеров каналов в слое можно не рассматривать, а передача тепла между элементами слоя незначительная вследствие малого градиента температур. Можно учитывать нагрев излучением только верхнего слоя шихты от излучающего факела.

Принятая в металлургической практике методика расчетов теплообменных процессов в печах, работающих по схеме плотного противоточного слоя, разработанная Б. И. Китаевым, позволяет найти распределение температур в слое при квазистационарных условиях: распределение температур как по горизонтали, так и по вертикали постоянно во времени и зависит только от координаты.

Слой шихты характеризуется при этом высотой h , постоянным сечением s , массой $M_{ш}$, теплоемкостью $c_{ш}$, теплоемкостью газов c_r , расход газов постоянен и равен V_r . Причем c_r и $c_{ш}$ равны значениям c при средней температуре.

В элементарном слое изменения энтальпий шихты и газов равны: $di_{ш} = di_r$ или $dq_r = di_{ш, r}$.

При конвективном теплообмене

$$\alpha_v(t_r - t_{ш})sdx = M_{ш}c_{ш}dt_{ш} = W_{ш}dt_{ш}, \quad (1)$$

где α_v – объемный коэффициент теплоотдачи: $\alpha_v = \alpha F$.

При $t_{ш}^{\text{нач}} = 0$ $W_r t_r^{\text{нач}} - W_r t_r^{\text{кон}} = W_{ш} t_{ш}^{\text{кон}}$ и $t_r = t_r^{\text{кон}} + \frac{W_{ш}}{W_r} t_{ш}$.

Подставив это выражение в (1), получим

$$dt_{ш} + \frac{\alpha_v s}{W_{ш}} \left(1 - \frac{W_{ш}}{W_r}\right) t_{ш} dx - \frac{\alpha_v s}{W_{ш}} t_r^{\text{кон}} dx = 0 \quad (2)$$

или при граничных условиях слоя

$$t_{ш} = t_r^{\text{нач}} \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha_v s}{W_{ш}} \left(1 - \frac{W_{ш}}{W_r}\right) x\right)\right). \quad (3)$$

Исследования температурного режима нагреваемого слоя шихты показали, что имеется близкое совпадение характера процесса и распределения температур в слое кускового материала и нагреваемой сплошной заготовке при граничных условиях I рода при нестационарной теплопроводности при идентичных коэффициентах температуропроводности α , описываемых известным уравнением.

Такое подобие, несмотря на принципиальное различие процессов передачи тепла теплопрово-

дностью и конвекцией, позволяет сделать предположение о возможном применении уравнения Фурье для описания процесса подогрева шихты в слое, где решающую роль в передаче тепла играет конвекция.

В этом случае вместо теплового сопротивления теплопроводности $R_\lambda = \left(\frac{S}{\lambda}\right)$ можно использовать аналогичную величину $R_\alpha = \left(\frac{1}{\alpha_\kappa}\right)$, отнесенную к характерному размеру элемента слоя. Для упрощенных решений, так же как в практике решений уравнений нестационарной теплопроводности, можно принять эту величину постоянной в диапазоне температур процесса.

В общем виде уравнение Фурье–Кирхгофа для сплошной среды имеет вид

$$\frac{Dt}{d\tau} = a\nabla^2 t, \quad (4)$$

где $\frac{Dt}{d\tau}$ – полная производная температуры; ∇^2 – оператор Лапласа; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ (λ – необходимо в данном случае отнести ко всему слою, так же как коэффициент теплоемкости c и плотности ρ); $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр куска шихты.

Для условий нагрева слоя шихты уравнение (4) можно заменить модифицированным уравнением, где вместо $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ используется $a_{\text{пр}} = \frac{\alpha_\kappa d_{\text{экв}}}{c\rho}$, т. е. фактически уравнением нагрева неподвижного сплошного материала, эквивалентного по своим теплофизическим характеристикам слою кусковых материалов за счет передачи тепла конвекцией внутри слоя.

В одномерном виде без учета перемешивания слоя

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\text{пр}} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (5)$$

При этом изменения температуры по горизонтальным сечениям слоя считаем незначительными, а перенос тепла по условию осуществляется вдоль координаты x .

Для расчета уравнения (5) можно использовать стандартную методику [1]. Используя метод разделения переменных, текущую температуру t представим как $t = f(x)f(\tau)$, т. е. произведение двух функций, зависящих соответственно только от x и τ . Обозначив $f(x)$ и $f(\tau)$ величинами L и T и проинтегрировав их, получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = L \frac{dT}{d\tau}, \quad \frac{\partial t}{\partial x} = T \frac{dL}{dx}, \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = T \frac{d^2 L}{dx^2}.$$

Подставив эти выражения в (5), получим

$$\frac{1}{a_{пр}T} \frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{L} \frac{d^2L}{dx^2}. \quad (6)$$

Равенство (6) выполняется при условии, что левая и правая части уравнения равны постоянной величине. Обозначая эту константу как $-\beta^2$ (минус характеризует то обстоятельство, что по ходу движения газового потока в слое, иначе с увеличением времени τ , температура падает) и, проведя преобразования, получаем:

$$\frac{t-t_0}{t_{г}-t_0} = 1 - \frac{2 \sin(h\beta) \cos(\beta x)}{h\beta + \sin h\beta \cos h\beta} e^{-(h\beta)^2 F_0}. \quad (7)$$

Порозность слоя принимаем равной 0,4–0,5, что соответствует реальной шихте, состоящей из скрапа и возврата. Коэффициент теплопроводности можно рассчитать как суммарный, состоящий из парциальных вкладов $\lambda_{ш}$ металла и $\lambda_{г}$ газовой прослойки.

В этом случае $\lambda_{\Sigma} = n_{ш}\lambda_{ш} + \lambda_{г}n_{г}$:

$$\lambda_{\Sigma} = 0,6(48 - 51) + 0,4(0,05 - 0,08) = (29 - 30), \text{ Вт/(м·К)}.$$

По экспериментальным данным, полученным на опытно-промышленной установке, поверхностный коэффициент теплообмена α при подогреве шихты колеблется от 15 до 30 Вт/(м²·К). Для слоя шихты при $S \geq 1$ м число $Bi \gg Bi_{кр}$.

Для определения эквивалентного диаметра $d_{экр}$ элементов слоя на практике можно использовать статистические данные по результатам измерений типичных засыпок из шихтовых материалов, а также эмпирические методики, основанные на многократном измерении сопротивления прохождению газа через слой при изменении скоростных показателей потока.

Коэффициент конвективного теплообмена α_k в критериальной форме определяется как функция от Re и Nu . Скорость по уравнению потока $Q_T = \alpha \Delta T F \tau$.

Используя для решения метод источника [1] для уравнения (7), получаем выражение для текущей температуры:

$$t = \frac{\Delta T_n}{2\sqrt{\pi a_{пр} \tau}} \exp\left(-\frac{(x-h)^2}{4a_{пр} \tau}\right) dh, \quad (8)$$

где ΔT_n – температура источника, в данном случае температура газов на входе в слой; h – высота слоя.

После получения исходных параметров работы установок была подготовлена база данных для проведения компьютерного моделирования про-

цессов движения газов в слое шихты и теплообмена при продувке слоя.

Процессы, связанные с течением газов, описываются законами неразрывности, сохранения моментов и энергии. Эти законы выражаются в виде дифференциальных уравнений в частных производных.

Для решения принимаются следующие приближения:

фазовое состояние не изменяется, характер движения турбулентный, газ несжимаемый.

Уравнение неразрывности с учетом нагрева газа (для двухмерной задачи) по тракту

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

Здесь v_x, v_y – компоненты вектора скорости в направлениях x, y ; ρ – плотность.

Алгоритм сжимаемого течения используется для стабилизации параметров решателя при использовании сложной геометрии и сгущения сетки КЭ в местах экстремальных значений температур и скоростей, в связи с тем что рабочие объемы газа-теплоносителя уменьшаются пропорционально температурному биному $(1 + \alpha t)$, где $\alpha = 1/273$.

Уравнение энергии с учетом теплопереноса:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho c_p t_0) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x c_p t_0) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y c_p t_0) = \frac{\partial}{\partial x}\left(K \frac{\partial t_0}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K \frac{\partial t_0}{\partial y}\right) + W^V + E^k + \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (10)$$

где c_p – удельная теплоемкость; t_0 – температура торможения; $K = a_{пр}$; W^V – работа сил вязкости; E^k – кинетическая энергия.

Статическая температура вычисляется из общей температуры и кинетической энергии:

$$t = t_0 - \frac{v^2}{2c_p}. \quad (11)$$

Здесь t – статическая температура; v – вектор скорости газа.

Статическая и полная температура для узлов, формирующих твердые элементы модели, равны.

Кинетическая энергия выражается как:

$$E^k = -\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K}{c_p} \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}|v^2|\right)\right] - \frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K}{c_p} \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{2}|v^2|\right)\right]. \quad (12)$$

Мгновенные скорости в любой точке нестационарного (флуктуационного) потока изменяются как по абсолютному, так и векторному значениям.

При этом скорость равна

$$v_x = \bar{v}_x + v'_x, \quad (13)$$

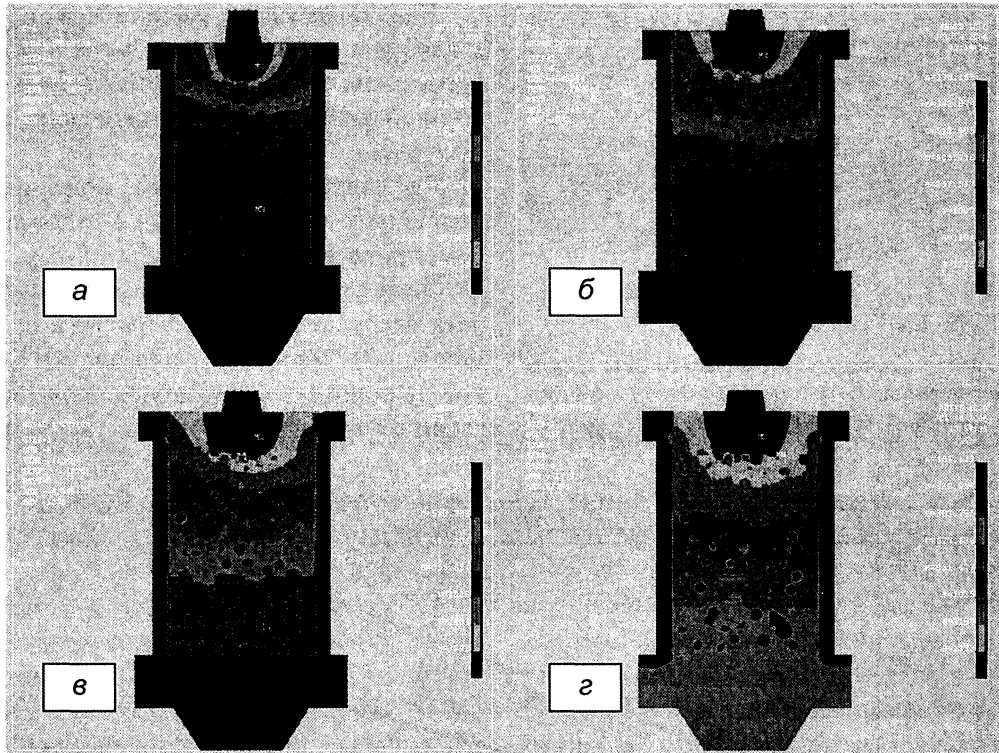


Рис. 2. Цветокodированная картина распределения температур в слое шиксты при предварительном нагреве (результаты численного моделирования): а – через 100 с; б – через 250 с, в – через 500 с, з – через 750 с



Рис. 3. Цветокodированная картина распределения температур на верхнем участке слоя

где \bar{v}_x – средний компонент скорости в направлении x ; v'_x – флуктуационный компонент скорости в направлении x .

Временной интервал для интегрирования выбирается произвольным образом, с учетом того, что он должен быть достаточным для получения значений, близких к действительным, и не превышать значения, при котором необходимо учитывать временной фактор в ходе интегрирования.

Скорости в уравнениях моментов также являются средними.

Уравнение для кинетической энергии:

$$\frac{\partial \rho K}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho v_x K)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y K)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial y} \right) + \frac{C_4 \mu_t}{\sigma_t} \left(g_x \frac{\partial t}{\partial x} + g_y \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad (14)$$

где σ_k , C_4 – постоянные в k - ϵ -модели турбулентности; σ_t – число Шмидта; μ_t – вязкость потока, обусловленная турбулентностью.

Решение для уравнений турбулентности используется для вычисления эффективной вязкости и эффективной теплопроводности.

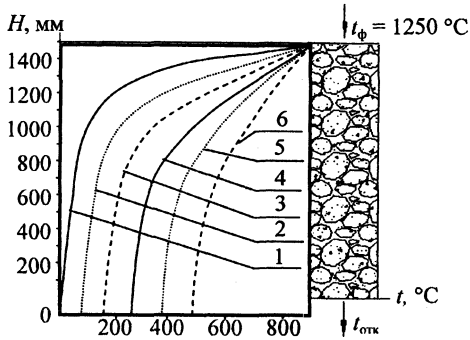


Рис. 4. Распределение температуры по высоте слоя шихты в зависимости от времени: 1 – 1–3 мин; 2 – 3–5; 3 – 5–7; 4 – 7–9; 5 – 9–12; 6 – 12–15 мин

Данная методика расчета может быть использована для расчета теплообмена в установках подогрева шихты и плавильных агрегатах литейного производства с послойным движением теплоносителя.

Результаты численного моделирования, выполненного в соответствии с изложенным способом, приведены на рис. 2, 3.

Экспериментальная проверка результатов расчета распределения температур в слое нагреваемой шихты массой 5 т для плавки в индукционной печи показала хорошую сходимость с расчетными данными (рис. 4).

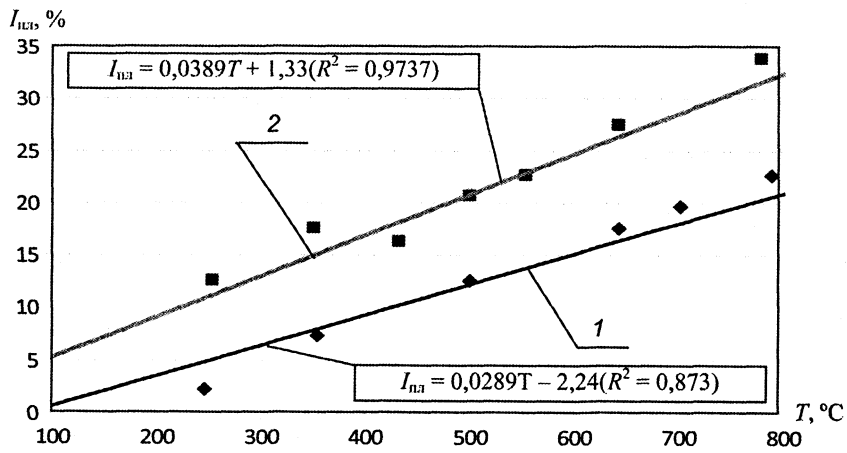


Рис. 5. Повышение производительности индукционных плавильных печей ($I_{пл}$, %) при предварительном нагреве шихты до температуры (T , °C): 1 – плавка стали; 2 – плавка чугуна

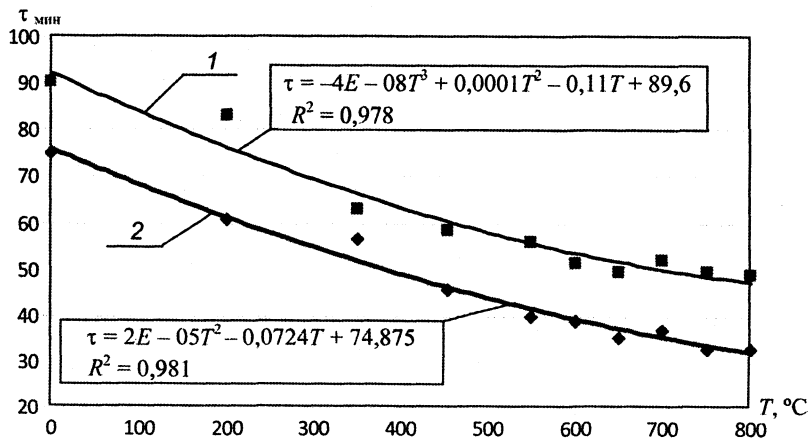


Рис. 6. Продолжительность расплавления металлозавалки ($t_{мин}$) при загрузке нагретой шихты до температуры (T , °C): 1 – ДСП-6; 2 – ДСП-50

Увеличение производительности электропечей при использовании предварительного подогрева может достигать по опытным данным 25–35% (рис. 5), а сам процесс расплавления металлозавалки (для дуговых сталеплавильных печей ДСП-6 и ДСП-50) сокращается до 2,0–2,5 раз (рис. 6).

Приведенные на графиках уравнения регрессии построены по результатам обычных произ-

водственных плавок (без изменения заводской технологии) за исключением естественно использования установок подогрева шихты.

Опыт использования подобных установок подогрева шихты как на дуговых печах при плавке стали, так и чугуна в индукционных печах обеспечивает их окупаемость в течение примерно 3–5 мес.

Литература

1. Масленникова В. Н. Дифференциальные уравнения в частных производных. М.: Машгиз, 1997.