КАЗАНЦЕВ Е.И., ГИНКУЛ С.И. (ДОНГТУ)

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ

На основании решения оптимизационных задач с затребованными технологическими ограничениями (на максимально и минимально возможные значения параметров и заданными критериями оптимальности) разработаны математические модели, позволяющие рассчитать температурный и тепловой режимы печи во времени, обеспечивающий нагрев металла по выбранным критериям оптимальности.

Решения основного дифференциального уравнения теплопроводности, выполненные немецким обществом инженеров-металлургов при некоторых краевых условиях были представлены в безразмерном виде и табулированы. Позднее на этой основе были построены графики, которые используются и до настоящего времени.

Широкое распространение в последнее десятилетие получили электронно-вычислительные машины и особенно в последние годы ЭВМ типа РС, которые дали возможность использовать численные методы решения дифференциальных уравнений практически при любых краевых условиях.

Все это в настоящее время надо считать уже пройденным этапом и все температурные и тепловые режимы промышленных печей необходимо рассчитывать только на условиях оптимизации или, в крайнем случае, субоптимизации. С нашей точки зрения все эти решения относятся к разряду «ноу-хау» и в настоящих, рыночных условиях, должны быть защищены опционными соглашениями.

Оптимизация работы промышленных печей должна быть различной для печей непрерывного и печей периодического действия. Дальше, она будет отличаться для новой печи, старой или реконструируемой существующей печи.

Здесь и дальше мы говорим о промышленных печах и о нагреве изделий в них. Охлаждение тел с математической точки зрения представляет ту же самую задачу только с обратным знаком. Поэтому дальше мы говорим только о нагреве, подразумевая, что все сказанное может быть соответствующим образом использовано и для охлаждения тел.

Для каждого из обозначенных ниже случаев могут разбираться различные варианты оптимизации с определенными признаками и/или ограничениями.

Оптимизация работы печи должна производиться по различным условиям, так, например.

а) Оптимизация может выполняться с учетом затрат на: топливо; угар металла; расход энергии на дальнейшую обработку материала (прокатку, ковку и пр.); фиксированное обезуглероживание и окалинообразование; желание получить высокое качество нагрева металла по условиям технологии перед его обработкой (давлением, термической и др.); интегральному показателю, например, по показателю минимума общей стоимости нагрева и др.

б) Субоптимизация работы печи по какому-либо частному показателю: минимуму окалинообразования; наиточнейший нагрев — с наперед заданными отклонениями температур Δt от заданной температуры в сторону «+» или «–», с одним или несколькими экстремальными значениями в промежутке по толщине; наискорейший нагрев (с максимальной производительностью), общий или в отрезках времени или в температурном интервале; с фиксированным или наименьшим расходом топлива, связанным с зоной печи или периодом нагрева; с наилучшим качеством нагрева поверхности изделия, например, с окисленным и удаленным обезуглероженным слоем; с постоянным разрежением (тягой), создаваемым дымовой трубой $h_{\text{трб}}=const$ и т.п.

в) На решение задач по оптимизации могут быть потребованы различные ограничения: по максимальному расходу топлива; по минимальному расходу топлива; по максимальной тепловой мощности; по минимальной тепловой мощности; по максимальному расходу продуктов сгорания, удаляемых из рабочего пространства печи; по длине рабочего пространства печи (отапливаемой); по наивысшей температуре всей печи или в определенной зоне и т.д. и т.п.

Эти показатели будут иметь существенное влияние на конечный результат, который будет также различен для печей периодического или непрерывного действия (прямоточных или противоточных), с устройствами утилизации тепла отходящих продуктов горения или без таковых. Кроме того, существенное влияние на конечный результат будут иметь: потери тепла рабочим пространством печи, подогрев газа и воздуха, коэффициент расхода воздуха, подсос холодного воздуха, выбивание пламени, стойкость огнеупорной кладки, изоляция отдельных элементов, коэффициент использования тепла топлива (КИТ) и проч. С точки зрения работы печи, наиболее существенным является фактор минимума стоимости нагрева. Эта задача может быть решена точно только для конкретно взятой печи.

Как показывают выполненные нами решения задач о ходе изменения температуры (режима работы) печи, в зависимости от поставленных условий нагрева изделий, оно может быть совершенно различным. В одних случаях это понижение температуры печи по ходу нагрева, в других, наоборот — повышение, в третьих — это повышения и понижения с различными скоростями и ускорениями. Все определяют конкретные, заданные условия — цели, задачи, ограничения и прочее.

Для решения вопроса минимизации стоимости нагрева необходимо иметь все конкретные показатели работы печи, данные ее конструкции, необходимые начальные и конечные условия для нагреваемого материала и др. Решение такой задачи может быть выдано в виде комплекса программ группой программистов (15–20 человек) во главе с постановщиком и руководителем примерно за год-полтора работы, т.е. необходимо 20–30 человеко-лет.

Существуют различные методы оптимизации [1], в одних из них используется строгий подход к рассматриваемой задаче, но они получаются сложными и трудными в реализации. Другие методы позволяют решать более упрощенные задачи, но их легче реализовать и получаемые результаты приемлемы для практических целей (задач). Таким методом является метод линейного программирования (симплекс-метод) [2]. Применение симплекс-метода предполагает, что задача будет линейной.

Дифференциальное уравнение, описывающее перенос тепла в одномерных телах, можно записать в виде:

$$c\rho\frac{\partial t}{\partial \tau}=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2}+\frac{\nu}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right), \qquad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$t(r,0)=t_0=const\,; \qquad (2)$$

$$-\lambda\frac{\partial t}{\partial r}\Big|_{r=0}=0;$$

$$-\lambda\frac{\partial t}{\partial r}\Big|_{r=r_0}=\alpha(U-t), \qquad (3)$$

где ν — коэффициент формы тела (ν=0 — плита; ν=1 — цидиндр; ν=2 — шар).

Теплофизические коэффициенты c, ρ, λ и коэффициент теплоотдачи α принимаем постоянными в первом приближении.

Уравнения (1), (2), (3) решались по неявным схемам методом прогонки [7], тело разбивалось на n сечений, а все время на m интервалов.

Управляющей функцией является температура среды и, чтобы применить симплекс-метод, необходимо выразить все переменные через управляющую функцию. Для линейной задачи применяется метод определения температуры тела с использованием коэффициентов влияния [10].

Для внешней и внутренней линейности уравнений (1)–(3) температура тела в i-ом сечении в j-й момент времени от действия на каждом интервале времени температуры среды U_s определяется по следующей формуле:

$$t_i^j = \sum_{s=1}^{j} a_{si}^j \cdot U_s .$$

Коэффициент a_{si}^j определяется по следующей методике. Примем, что на первом интервале времени температура среды U_1=1, а на остальных равняется 0. Определим коэффициенты влияния:

$$a_{1i}^1,\ a_{1i}^2,\ a_{1i}^3, ...,\ a_{1i}^m .$$

Аналогично для остальных интервалов времени. Тогда температура тела на первом интервале времени:

$$t_i^1 = a_{1i}^1 \cdot U_1 .$$

На втором интервале времени:

$$t_i^2 = a_{1i}^2 \cdot U_1 + a_{2i}^2 \cdot U_2 .$$

Для m-го интервала времени:

$$t_i^m = a_{1i}^m \cdot U_1 + a_{2i}^m \cdot U_2 + ... + a_{mi}^m \cdot U_m .$$

Рассмотрим некоторые конкретные случаи ограничения и/или оптимизации по отдельным показателям.

Заданное качество нагрева — оптимальный температурный режим

Нагрев металла это вспомогательная операция при прокатке, термообработке и проч. Основной задачей нагревательных печей является обеспечение прокатного стана или других агрегатов качественно нагретым металлом при высоких экономических показателях [3].

Требования, предъявляемые к качеству нагрева металла, различны. В одних случаях — это обеспечение заданного перепада температур между поверхностью и серединой заготовки. В других — это обеспечение наиточнейшего нагрева, т.е. необходимо за заданное время нагреть металл таким образом, чтобы получить как можно меньше перепад температуры по сечению относительно заданного значения и проч. Такая задача может быть поставлена, например, при термической обработке, чтобы получить прокаливаемость стали на определенную глубину.

Задача наиточнейшего нагрева металла может быть сформулирована следующим образом: требуется за заданное время τ нагреть тело до заданной температуры таким образом, чтобы максимальное отклонение температур по сечению тела относительно заданной температуры t^*, было минимально возможным (рис. 2). С точки зрения технологии, такие требования могут быть выдвинуты при термообработке, прокатке и др.

$$z = min\,max\,y_i\,;\ y_i = \left| t_i - t_i^* \right|, \tag{4}$$

при следующих ограничениях:

$$U_j \le \left[U_j\right];\ t_j \le \left[t_j\right];\ \Delta t \le \left[\Delta t\right], \qquad (5)$$

здесь i — номер сечения тела; j — номер момента времени τ; $[U_j]$, $[t_j]$, $\left[\Delta t\right]$ — соответственно максимально допустимые значения температуры среды, поверхности и перепада температур по сечению тела в процессе нагрева; t_i — температура в i-ом сечение тела через время τ; U_j — температура среды на j-ом интервале времени; t_j — температура поверхности на j-ом интервале времени; Δt — перепад температур между заданными сечениями.

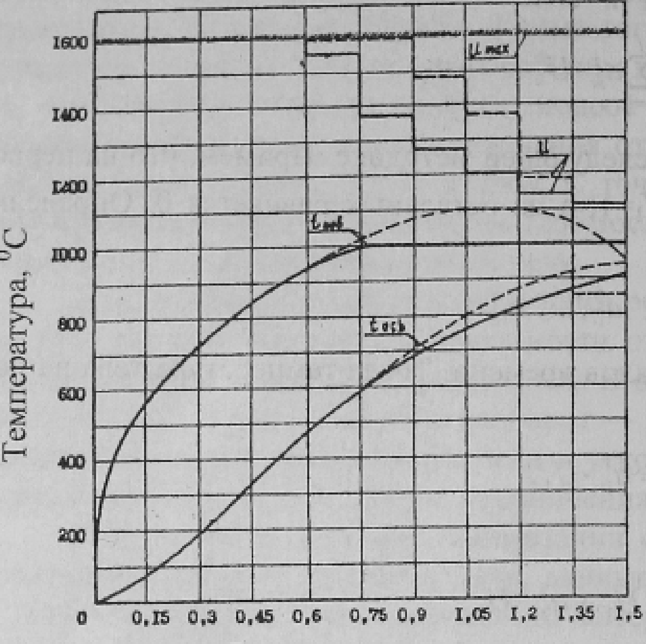

Рис. 1. Режим нагрева плиты с заданными параметрами при различных ограничениях на температуру поверхности

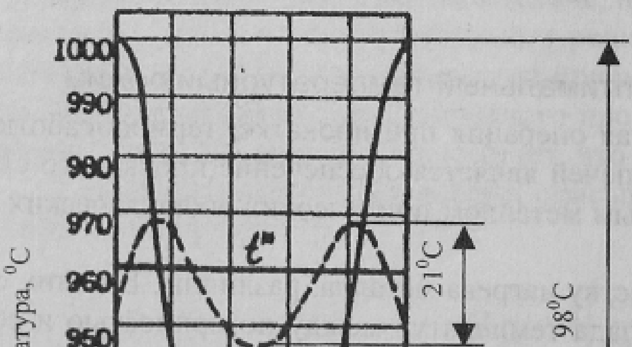

Рис. 2. Распределение температуры по сечению пластины в конце времени нагрева при различных ограничениях на температуру поверхности

В качестве примера рассмотрим нагрев плиты толщиной δ=0,4 м с теплофизическими свойствами с=0,543 кДж/кг·К; ρ=7700 кг/м^3; λ=35 Вт/м·К; α=262 Вт/м^2·К. Максимально допустимая температура среды $\left[U\right] = 1600°C$. Необходимо осуществление равномерного нагрева по сечению плиты относительно заданной температуры t^*=960°С за заданное время τ при различных ограничениях.

На рис. 1 приведены результаты расчета оптимального режима при ограничениях на температуру поверхности $t_{n1} \le 1000°C$ и $t_{n2} \le 1100°C$. В начальный период температура среды выдерживается максимальной до тех пор, пока это не вызовет ограничения на температуру поверхности. Затем температура среды понижается.

При достижении на поверхности $t_{n1} = 1000°C$ она остается постоянной до конца нагрева. Максимальное отклонение по сечению от заданной температуры достигается в конечный момент времени на оси (Δt_1=98°С) (рис. 2). Снижение температуры поверхности происходит в том случае, если перепад температур в процессе нагрева между поверхностью и заданной температурой составляет большую величину, чем перепад между температурой поверхности и оси к концу нагрева, а по ходу нагрева температура оси приближается к заданной.

Совсем по другому изменяется температура поверхности при ограничении $t_{n2} \le 1100°C$. Когда температура поверхности становится равной $t_{n2} = 1100°C$, она выдерживается постоянной непродолжительное время, а затем понижается для получения минимального отклонения температуры по сечению тела от заданной (рис. 1) 960°С и отклоняется в пределах +8°С и –13°С.

В этом случае перегрев температуры поверхности по ходу нагрева оказался более существенным. Это дало возможность за счет большего градиента температуры в процессе нагрева по сечению тела за то же время нагрева получить более равномерный нагрев тела, чем при ограничении температуры поверхности величиной 1000°С Наибольшее отклонение полученной температуры от заданной составляет 13°С (рис. 2). В технологическом отношении это может оказаться более привлекательным и весьма существенно повлиять на показатели качества конечного продукта, например, при термообработке.

Ограничение перепада температур по сечению тела в течение всего нагрева

На рис. 3 приведен нагрев той же плиты при ограничениях, например, из-за возникновения нежелательных температурных напряжений, на перепад температур внутри тела по ходу нагрева $[\Delta t]$=200°С и температуру поверхности $t_п \leq 1100°С$. Исходя из этих ограничений, получим такую температуру среды, при которой в течение всего периода нагрева выдерживается перепад температур $\Delta t \leq 200°С$. Конечное распределение температур сильно отличается от предыдущего. В данном случае тепловой режим печи таков, что за назначенное время τ=1,5 ч требуемое качество нагрева не получено, поэтому необходимо увеличить время нагрева или менять тепловой режим работы печи. Задача может решаться и для заданного интервала температур.

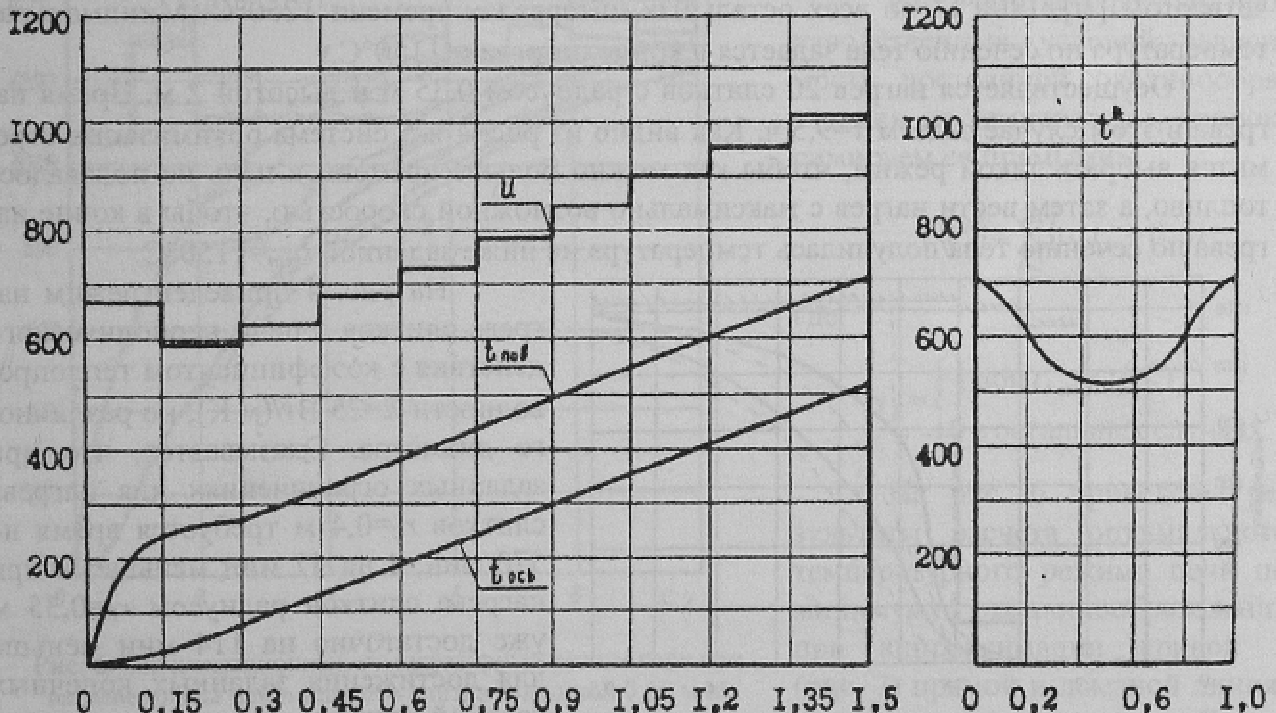

Рис. 3. Расчет оптимального режима нагрева при ограничениях на $t_{пов} \leq 1100^0С$ и $\Delta t \leq 200^0\,С$

Оптимизация по минимуму расхода топлива

В современных условиях дефицита энергоносителей и сырых материалов особые требования предъявляются к созданию энерго- и ресурсосберегающих технологий производства. Разработка режимов таких технологий предусматривает использование методов оптимизации для получения и выбора наилучших параметров производства и получения наилучших конечных результатов.

Металлургическая промышленность является весьма энергоемкой, технологические процессы и операции в ней совершаются в основном при высоких температурах. В нынешних условиях обеспечение максимальной производительности агрегатов и устройств уходят на второй план. Главными являются проблемы энергосбережения и экономии сырья и материалов и основная задача нагрев металла по минимуму расхода топлива.

При нагреве металла по минимуму расхода топлива функция цели запишется:

$$B = \sum_{j=1}^{m} V_m^j \,\Delta\tau \rightarrow min, \tag{6}$$

где V_m^j — расход топлива на j-ом интервале времени, м^3/с; $\Delta\tau$ — длительность j-го интервала времени, с; B — расход топлива за весь процесс нагрева, м^3/нагрев;

Систему ограничений (5) необходимо дополнить еще неравенством. Она будет иметь вид:

$$U_i \le [U_i];\ t_i \le [t_i];\ \Delta t \le [\Delta t];\ t^*_{i\,min} \le t_i, \tag{7}$$

где $t^*_{i\,min}$ — минимально допустимая температура в i-ом сечении тела через время $\tau_к$, т.е. в конце нагрева, °С.

Рассмотрим конкретный пример расчета температурного режима нагревательного устройства периодического действия по минимуму расхода топлива — максимально допустимая температура печи, например, принималась в данном случае равной: в первом интервале времени $[U]$=1000°С, во втором $[U]$=1100°С, в третьем $[U]$=1150°С, в четвертом $[U]$=1200°С, во всех остальных интервалах времени 1250°С. Минимальная температура по сечению тела задается в конце нагрева t=1150°С.

Осуществляется нагрев 20 слитков с радиусом 0,35 м и высотой 2 м. Время нагрева в этом случае задаем τ=9,5 ч. Как видно из рис. 4 и 5 система оптимизации стремится выбрать такой режим, чтобы как можно больше времени в печь не подавалось топливо, а затем вести нагрев с максимально возможной скоростью, чтобы в конце нагрева по сечению тела получилась температура не ниже заданной t_{min}=1150°С.

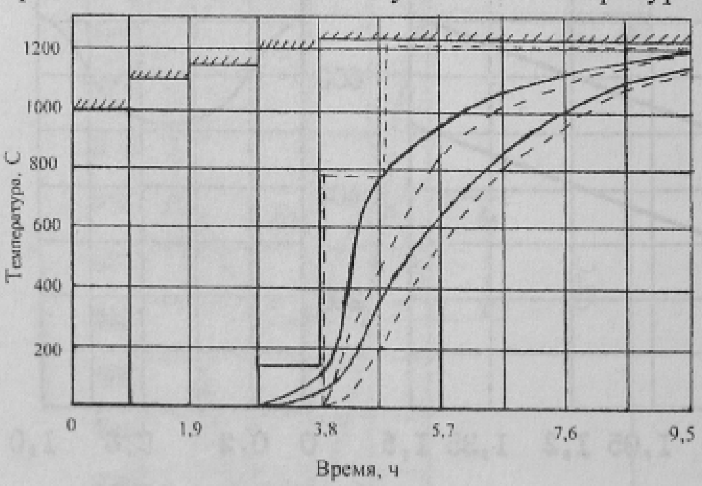

Рис. 4. Режим нагрева слитков с B_m=min при r_0=0,35 м (– – –) и 0,4 м (——) в печи периодического действия

На рис. 4 приведен режим нагрева слитков в печи периодического действия с коэффициентом теплопроводности λ=25 Вт/(м·К), но различного диаметра. Оказывается, что при заданных ограничениях для нагрева слитков r_0=0,4 м требуется время не 570 мин, а на 57 мин меньше; и при нагреве слитков радиусом r_0=0,35 м уже достаточно на 114 мин меньше для достижения заданных конечных условий нагрева.

На рис. 5 приведен режим нагрева слитков r_0=0,35 м, но с более высоким коэффициентом теплопроводности λ=35 Вт/(м·К). Увеличение коэффициента теплопроводности с λ=25 Вт/(м·К) (рис. 4) до λ=35 Вт/(м·К) (рис. 5) привело к уменьшению времени нагрева с 456 мин. до 400 мин. При коэффициенте теплопроводности λ=45 Вт/(м·К) время нагрева составило 342 мин. Увеличение коэффициента теплопроводности приводит к более быстрому прогреву металла и за счет этого к уменьшению потерь тепла с мощностью холостого хода печи.

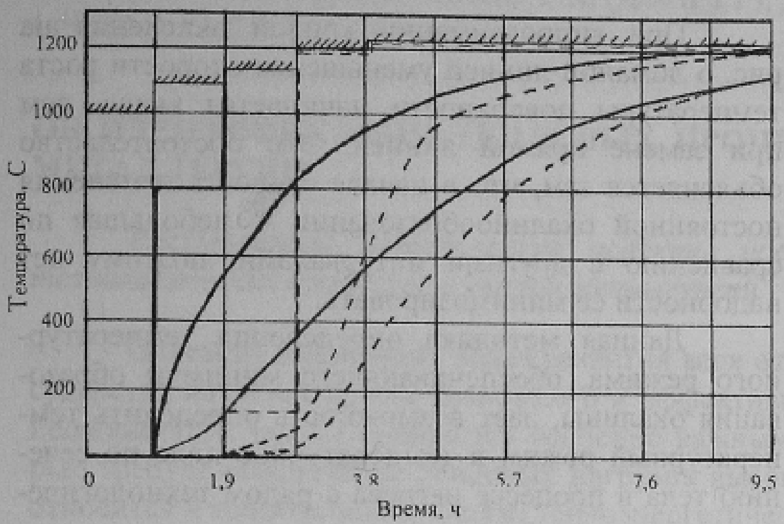

Рис. 5. Режим оптимального нагрева слитков (——) λ=25 Вт/м·К и (– – –) λ=35 Вт/м·К

Оптимизация по минимуму окалинообразования

При нагреве металла, особенно дорогостоящего, важной задачей является уменьшение потерь от угара [4–6], т.е. актуальной является необходимость разработки такого режима нагрева, который может обеспечить минимальное окалинообразование металла.

Нагрев металла по минимуму окалинообразования можно выполнить при технологических ограничениях, описываемых системой (7), а функция цели выразится уравнением:

$$S^2 = \sum_{j=1}^{m} f\left(t_n^j\right)\Delta\tau . \qquad (8)$$

где S — толщина окалины, мм; t_n — температура поверхности, °C; m — число шагов по времени.

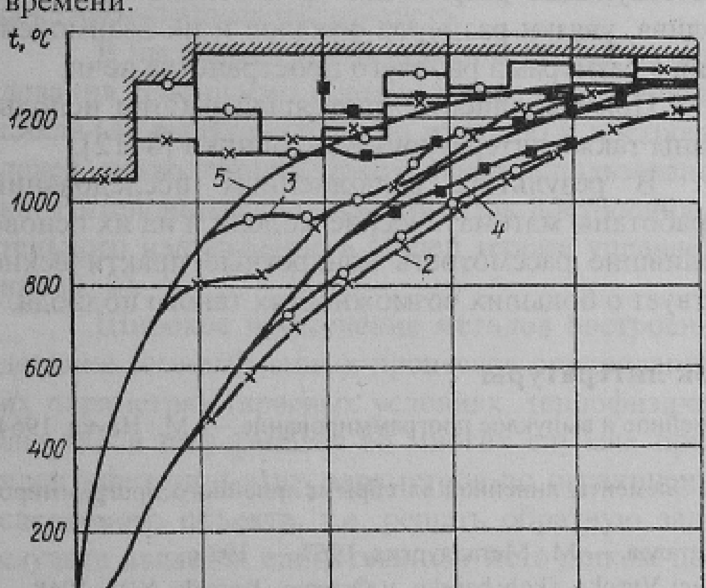

Рис. 6. Оптимизационный температурный режим печи при нагреве плиты или листового слитка толщиной 0,59 м из стали 40 по минимуму образования окалины. 2(x—x) — по минимуму образования окалины при интенсивном окалинообразовании выше 800°C; 3(o—o) — выше 950°C; 4(•—•) — выше 1100°C; 5(——) — по критерию наиточнейшего нагрева

Имея для конкретных производственных условий зависимость постоянной окалинообразования от температуры, аппроксимируем ее прямыми:

$$f\left(t_n^j\right) = \sum_{\ell=1}^{p}\left(\alpha_\ell t_n^j + \beta_\ell\right)\gamma_\ell ,$$

где:

$$\gamma_\ell = \begin{cases} 1 \text{ при } t_{\ell-1} < t_n^j \le t_\ell \\ 0 \text{ в остальных случаях} \end{cases} .$$

На рис. 6 приведены результаты расчета оптимального температурного режима печи по минимуму окалинообразования при аппроксимации кривой 1 (рис. 7) прямой и ломаной линиями. На этом графике (рис. 6) также приведен температурный режим, обеспечивающий наиточнейший нагрев металла.

Рассмотрим два случая аппроксимации кривой 1 (рис. 7) прямыми линиями: будем считать, что интенсивное окалинообразование а) начинается с 800°C (прямая 2) и б) с 1100°C (прямая 4). Как видно из рис. 6 при замене кривой 1 (рис. 6) прямыми линиями (2 и 4) вырабатывается такой режим нагрева, при котором металл выдерживается некоторое время вблизи температуры начала интенсивного окалино–образования (800 и 1100°C). Так продолжается до тех пор, пока не вступают в действие условия обеспечения заданного качества нагрева за заданное время.

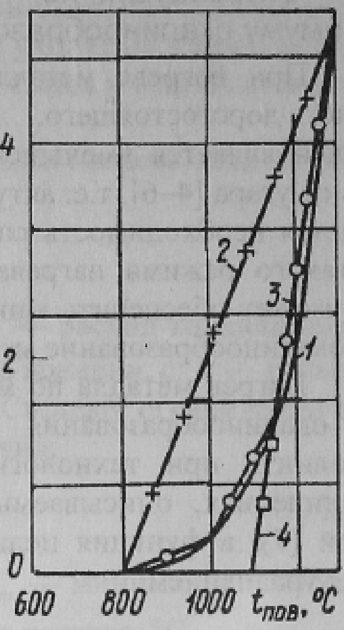

Рис. 7. Зависимость квадрата постоянной окалинообразования k^2 (1) от температуры поверхности при нагреве малоуглеродистых сталей в печной атмосфере: 2(х—х), 4(□—□) — аппроксимация кривой (1(——)) прямой линией (2) в случае интенсивного окалинообразования с 800°С и (4) — с 1100°С; 3(о—о) — аппроксимация кривой (1) ломаной линией

При аппроксимации кривой окисления на рис. 6 ломаной линией уменьшение скорости роста температуры поверхности начинается выше, чем при замене прямой линией. Это обстоятельство объясняется тем, что в начале скорость изменения постоянной окалинообразования k^2 небольшая по сравнению с другими интервалами, поэтому нет надобности ее минимизировать.

Данная методика определения температурного режима, обеспечивающего минимум образования окалины, дает возможность определить температурный режим и температурное поле по сечению тела в процессе нагрева с рядом технологических ограничений.

На основании температурных режимов нагрева изделий по известным методикам рассчитываются тепловые режимы работы печи и необходимые для их выполнения графики подачи топлива в рабочее пространство печи. Естественно, что до этого выполняются расчеты горения топлива и соответствующие разработки организации сжигания топлива, увязки размеров факелов и их взаимодействия с размерами рабочего пространства печи.

При выполнении настоящей работы использованы также литературные источники [8–12].

В результате выполненных исследований разработаны математические модели и на их основе созданы некоторые программы, позволившие рассмотреть конкретные практические случаи. Анализ результатов свидетельствует о больших возможностях такого подхода.

Список литературы

1. **Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И.** Линейное и выпуклое программирование. — М.: Наука, 1964. — 348 с.

2. **Карпелевич Ф.И., Садовский Л.Е.** Элементы линейной алгебры и линейного программирования. — М.: Физматиздат, 1963.

3. **Малый С.А.** Экономичный нагрев металла. — М.: Металлургия, 1967. — 192 с.

4. **Kazancev E.I.** Sbornik vedeky'ch praci Vysoke školy baňske v Ostrave, Ročnik XIV, 1968. — čislo 7, rada hutnicka. — S. 161–177.

5. **Казанцев Е.И.** Промышленные печи. — М.: Металлургия, 1975. — 368 с.

6. **Kazancev E.I.** Sbornik vedeky'ch praci Vysoke školy baňske v Ostrave, Ročnik XIV, 1968. — čislo 7, rada hutnicka. — S. 179–180.

7. **Самарский А.А.** Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971. — 552 с.

8. **Казанцев Е.И., Котляревский Е.М., Баженов А.В. и др.** Энергосберегающая технология нагрева слитков. — М.: Металлургия, 1992. — 176 с.

9. **Бровкин Л.А.** Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. — Иваново, 1973. — 366 с.

10. **Выпов Г.П., Гинкул С.И., Казанцев Е.И.** // Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1975. — № 5. — С. 173–178.

11. **Ольшанский В.М., Гузов Л.А., Тайц Н.Ю., Минаев А.Н.** // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1970. — № 3. — С. 47–50; 1971. — № 3. — С. 45–47.

12. **Рябков В.М.** // Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1973. — № 8. — С. 142–144.