

## **ЭКОНОМИЧНЫЕ РЕЖИМЫ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ ПО КОМПЛЕКСНОМУ КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА**

Раджух Маеин Ахмад  
БНТУ, Минск, Nekr@mail.ru

Развитие и совершенствование металлургического производства являются одним из перспективных направлений научно-технического прогресса народного хозяйства. В настоящее время большое внимание уделяется внедрению ресурсо-и энергосберегающих технологий. На металлургических предприятиях на прокатном переделе потребляется до 20 % общего расхода топлива и долгосрочные прогнозы указывают на устойчивую тенденцию увеличения доли стоимости энергий в себестоимости продукции.

Современная ситуация в энергетике, а также прогнозы её развития, позволяют сделать вывод о том, что доля стоимости энергоресурсов в себестоимости продукции будет расти. В связи с этим разработка энергосберегающих технологий нагрева металла в печах является весьма актуальной задачей.

Одним из способов решения этой задачи является разработка экономичные режимы нагрева металла в печах по комплексному критерию качества.

Повышение общей экономической эффективности металлургического производства может быть достигнуто только путем оптимизации теплотехнологий обработки металла. Именно поэтому актуальной является задача оптимального управления теплотехнологиями обработки металла. Решение этой задачи позволяет сократить потери энергии, материалов, а также ведет к снижению себестоимости продукции.

Сложность процессов теплопередачи и недостаточность априорной информации о процессах нагрева металла в камерных печах приводят к необходимости создания математических моделей для последующей оптимизации этих процессов по тому или иному критерию качества [1,2].

В этой работе рассмотрена задача оптимального управления нагревом заготовок в камерных печах с учетом наиболее важных технологических ограничений. Критерием оптимальности является расход топлива. Окисление заготовок в процессе нагрева приводит значительным потерям металла.

Понятно, что в пламенных печах при нагреве металла процессы окисления металла и расхода топлива протекают одновременно. Поэтому возникает задача минимизации комплексного критерия качества, учитывающего как топливопотребление, так и окисление металла.

При исследовании процесса нагрева прямоугольных заготовок, расположенных с определенными зазорами в печах, оснащенных механизированным подом, требуется решать трехмерную задачу теплопроводности. Для наиболее распространенных типов ПЭВМ подобная задача

требует значительного количества системных ресурсов. Поэтому при упрощении постановки задачи переходим к решению двумерного уравнения теплопроводности при соответствующих начальных и граничных условиях [12].

Принимаются следующие допущения:

- 1) печь работает в стационарном режиме, т. е. температура в любом поперечном сечении не изменяется во времени;
- 2) начальное распределение температуры в заготовке и распределение температуры по длине печи известно;
- 3) заготовки уложены с определенными промежутками и нагреваются со всех четырех граней;
- 4) теплофизические свойства металла являются известными функциями температуры;
- 5) заготовки нагреваются в условиях лучисто-конвективного теплообмена, все поверхности являются серыми.

Пусть процесс изменения температуры греющей среды и нагреваемого металла в зависимости от расхода топлива описывается уравнениями [3,4,5]:

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} &= A_1 B + A_2 T + A_3 T_2; \\ \frac{dT}{dt} &= \mu(T_2 - T) \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными и конечными условиями:

$$T_2(0) = T_{20}; \quad T(0) = T_0; \quad T(t_k) = T_k, \quad (2)$$

где  $T_2(t)$ ,  $T(t)$  – температура греющей среды и нагреваемого металла в момент времени  $t$  соответственно;  $B(t)$  – расход газа в момент времени  $t$ ;  $t_k$  – время окончания процесса нагрева;  $\mu$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  – константы, характеризующие динамику процесса нагрева.

Экономический показатель зададим в виде

$$I = K_1 \int_0^{t_k} \frac{\kappa}{T(t)} \exp(-\beta/T(t)) dt + K_2 \int_0^{t_k} B(t) dt = I_1 + I_2. \quad (3)$$

Здесь  $K_1$ ,  $K_2$  – положительные постоянные, характеризующие штраф вследствие потерь металла с окалиной и расхода топлива;  $\kappa$ ,  $\beta$  – определяют динамику роста окалины [13];  $I_1$ ,  $I_2$  – соответствующие интегральные слагаемые.

Отметим, что величина  $I_1/K_1$  определяет величину окалины, образовавшуюся за время  $t_k$ , а  $I_2/K_2$  характеризует расход топлива. Если  $K_1$  и  $K_2$  определяют соответственно стоимость металла и топлива, то значение комплексного критерия качества (3) задает суммарные затраты, образующиеся за счет потерь металла с окалиной и вследствие расхода топлива.

Из условия достижимости температуры металла  $T_k$  и физических ограничений на расход

газа полагаем, что

$$0 < T_0 < T_k < \beta; \quad t_k > t_{\min}; \quad 0 < B_1 \leq B(t) \leq B_2; \quad 0 \leq t \leq t_k, \quad (4)$$

где  $B_1, B_2$  – минимальный и максимальный расходы топлива;  $t_{\min}$  – минимальное время нагрева металла до температуры  $T_k$ .

Задача оптимального управления заключается в выборе режима расхода топлива  $B(t)$  ( $0 < t \leq t_k$ ) в виде кусочно-непрерывной функции, удовлетворяющей условию (4), которая на решениях (1), (2) доставляет минимальное значение функционалу (3).

Рассмотрим вначале задачу о минимизации величины окалины, т. е. положим в (3)  $K_2 = 0$ .

Используя результаты работ [8], можно показать, что оптимальный режим нагрева имеет вид

$$B(t) = \begin{cases} B_1, & 0 \leq t < t_{\text{п}}; \\ B_2, & t_{\text{п}} \leq t \leq t_k, \end{cases} \quad (5)$$

$t_{\text{п}}$  – время переключения управления.

Для задачи минимизации топливопотребления (в (3)  $K_1 = 0$ ), используя результаты работ [14, 15, 16], имеем также, что оптимальный режим нагрева металла характеризуется двухступенчатым графиком нагрева типа (5). Если моменты переключения управления совпадают и так как  $K_1$  и  $K_2$  – положительные константы, то оптимальным режимом изменения расхода топлива для комплексного критерия качества (3) будет режим (5).

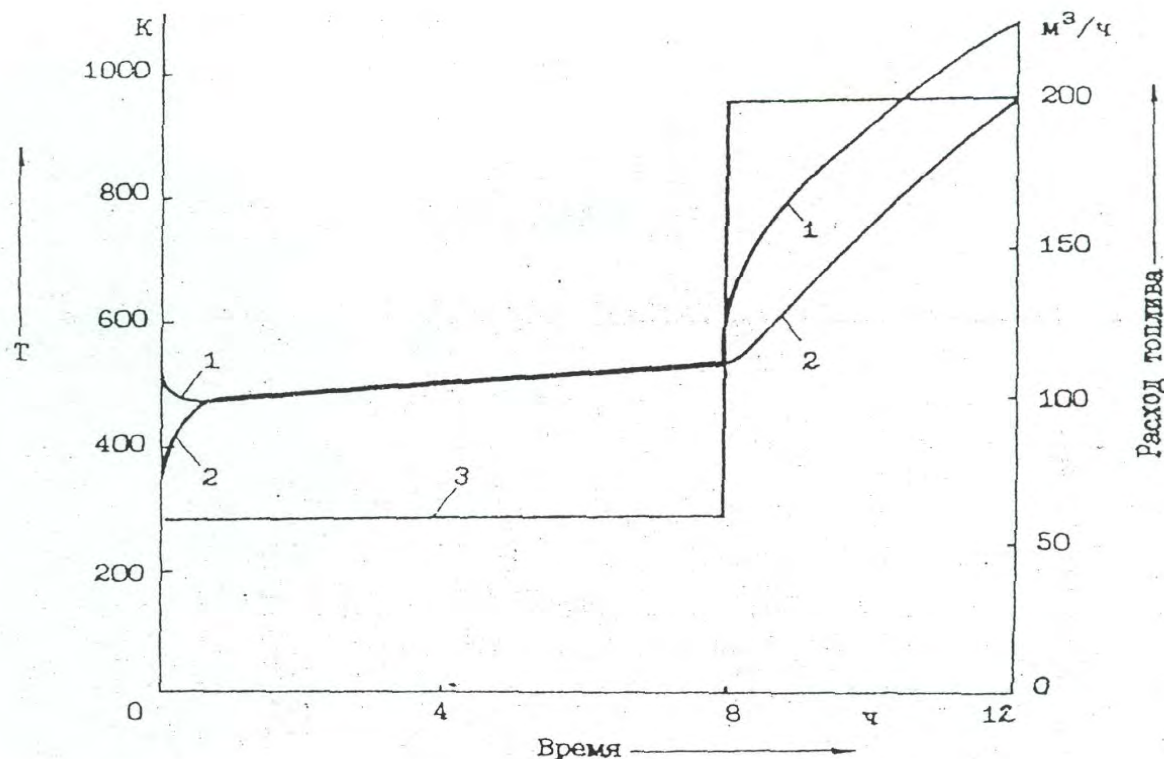
Покажем теперь, что моменты переключения управления совпадают. Пусть  $t'_{\text{п}}$  – момент переключения в задаче о минимизации расхода топлива. Тогда время  $t_{\text{п}}$  обязательно должно быть меньше, чем  $t'_{\text{п}}$ , так как в противном случае имеем два допустимых режима нагрева металла, при которых используется меньше топлива при минимизации окалины, чем при оптимизации расхода топлива, что невозможно.

В то же время, если  $t_{\text{п}} < t'_{\text{п}}$ , то это противоречит тому, что  $t_{\text{п}}$  – максимальное время нагрева с минимальным топливопотреблением. Следовательно, моменты времени переключения управления совпадают.

Таким образом, доказано, что оптимальные режимы нагрева с точки зрения окалинообразования являются оптимальными и с точки зрения топливопотребления.

Оптимальный режим нагрева по комплексному критерию качества характеризуется двухступенчатым способом подачи газа через горелочные устройства: до какого-то момента времени расход газа является минимальным, а затем становится максимальным, при этом в процессе нагрева должны обеспечиваться основные технологические ограничения (3), (5).

Пример оптимальной технологии приведен на рис. 1.



1-температура греющей среды; 2 - температура металла; 3 - расход газа

**Рисунок 1 – Оптимальная технология**

### **Выводы:**

Оптимальный режим нагрева по комплексному критерию качества характеризуется двух-ступенчатым способом подачи газа через горелочные устройства: на начальном этапе расход газа является минимальным, а затем становится максимальным, при этом в процессе нагрева должны обеспечиваться основные технологические ограничения.

### **Список использованных источников**

1. Раджух, М.А. Решение задачи идентификации модели процесса нагрева металла в камерных печах / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1997. - № 11-12. - С. 56-58.

2. Раджух, М.А. Определение расхода топлива на основе теплового баланса для печей камерного типа / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1998. - № 1. – С. 81-85.

3. Раджух, М.А. Оптимальный нагрев металла с минимальным расходом газа / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика - Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1998. – № 2. – С. 84-88.
4. Раджух, М.А. Оптимальный нагрев металла с минимальным окислением / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика - Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1998. – № 3. – С. 74-80.
5. Раджух, М.А. Экономичные режимы нагрева металла в печах по комплексному критерию качества / В.Б. Ковалевский, О.Ю. Седяко, М.А. Раджух // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. -1998. – № 4.-С. 61-63.
6. Раджух, М.А. Применение метода магистральной оптимизации для построения ресурсосберегающих технологий нагрева в камерных печах / М.А. Раджух // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 1999. – № 2.-С. 80-81.
7. Раджух, М.А. Нагрев заготовки в форме призмы по технологическим ограничениям / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Вестник БНТУ БНТУ. – 2009. – № 6. – С. 26-28.
8. Раджух, М.А. Оптимизация технологии работы камерной печи / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2009. – № 6. – С. 63-70.
9. Раджух, М.А. Оптимизация технологии нагрева металла в печи с целью снижения расхода топлива / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Литье и металлургия. - 2009. – № 4(53). - С. 174-175.
10. Раджух, М.А. Идентификация модели процесса нагрева металла в печи / В.Б. Ковалевский, М.А. Раджух // Литье и металлургия. – 2009. – № 4(53). - С. 176-178.
11. Раджух, М.А. К решению задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов с производной в функционале / М.А. Раджух // Материалы Восьмой международной научно-технической конференции БНТУ, Минск, 2010. – С. 249.
12. Раджух, М.А. Математическая модель процесса нагрева массивного тела в промышленных печах / М.А. Раджух // Материалы Восьмой международной научно-технической конференции БНТУ, Минск, 2010. – С. 250.
13. Ковалевский, В.Б. Оптимальный по расходу теплоты режим нагрева металла в камерных печах / В.Б. Ковалевский [и др.] // Изв. вузов. Энергетика. – 1992. – № 3. – С. 108–112.
14. Гусев, Д.Е. Теорема о магистрали в задаче непрерывной оптимизации / Д.Е. Гусев, В.А. Якубович // Вест. ЛГУ. Сер. Матем., мех., астр. – 1983. – Т. 1, Вып. 1. – С. 21–27.
15. Кротов, В.Ф. Методы и задачи оптимального управления / В.Ф. Кротов, В.И. Гурман – М.: Наука, 1973. 410 с.
16. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе. – М.: Наука, 1976. – 391 с.

