

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial F_1}{\partial X} + \frac{\partial G_1}{\partial Y} + \frac{\partial H_1}{\partial Z} &= 0; \\ \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial F_2}{\partial X} + \frac{\partial G_2}{\partial Y} + \frac{\partial H_2}{\partial Z} &= 0; \\ \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{\partial F_3}{\partial X} + \frac{\partial G_3}{\partial Y} + \frac{\partial H_3}{\partial Z} + \frac{\tilde{\rho}}{\text{Fr}} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Решение данной системы уравнений предполагается выполнять с использованием конечно-разностных методов.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ПЕРЕВООРУЖЕНИЕ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ МАССИВНЫХ ПОКОВОК

© Д.И. Спитченко, М.Д. Казяев, 2012

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург*

ОАО «Уралмаш» – ведущее российское предприятие тяжелого машиностроения, выпускающее оборудование для металлургии, горнодобывающей, нефтегазодобывающей промышленности и других отраслей. На предприятии имеется кузнечно-прессовый цех, продукцией которого являются крупные валки для прокатных станов, ротора турбин. В течение производственного процесса слитки подвергают прессованию, в результате которого получают поковку в виде валка, или ротора. Полученные изделия подвергают первичной термообработке. Первичная термообработка-нормализация осуществляется для образования равномерной структуры металла и проходит в три этапа: нагрев поковки до 950–980 °С, выдержки и охлаждения на воздухе.

Для первичной термообработки в цехе используются камерные печи с выкатным подом, выполненные по кирпичной технологии и оснащенные горелками устаревшей конструкции. Все печи, построенные по кирпичной технологии, футерованы в два слоя: внутренний огнеупорный слой – из шамота класса А, теплоизоляционный слой – из шамота легковеса. Толщина кладки составляет 460 мм. Печи работают в периодическом режиме. Большим недостатком кирпичной футеровки являются значительные потери с аккумуляцией тепла кладкой и потери тепла теплопроводностью через стенки. На печах установлены горелки типа ГНП. Разделение на физические зоны управления значительно усложняет процесс контроля и регулирования температуры в рабочем пространстве, приводит к сложной системе подвода газа и воздуха на горение. Подогрев воздуха осуществляется в рекуператоре до 200–300 °С.

Для сравнения печей, построенных по разным технологиям, были рассчитаны тепловые балансы. Тепловой баланс печи исследовали при нагреве поковки от 650 до 930 °С, с максимальной скоростью подъема температуры 65 °С/ч. Для печи, построенной по кирпичной технологии, использовались следующие исходные данные:

Расход природного газа:  $V = 720 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Теплота сгорания природного газа:  $Q_p^H = 34000 \text{ кДж/м}^3$ .

Коэффициент избытка воздуха:  $\alpha = 1,05$ .

Средняя температура подогрева воздуха:  $t_b = 200 \text{ °С}$ .

Теплоемкость подогретого воздуха:  $c_g = 1,332 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$ .

Средняя температура отходящих газов:  $t_{yx,г} = 810 \text{ °С}$ .

Энтальпия отходящих газов:  $i_{yx,г} = 1213 \text{ кДж/м}^3$ .

Теоретическое количество воздуха, необходимого для сжигания единицы топлива:  $L_0 = 9,53 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Разность между объемами продуктов сгорания и воздуха:  $\Delta V = 1,0$ .

Далее представлен расчет теплового баланса печи.

*Статьи прихода теплоты*

Химическая теплота топлива:

$$Q_x = B \cdot Q_p^H, \quad (1)$$

$$Q_x = \frac{720}{3600} \cdot 34000 = 6800 \text{ кВт}.$$

Физическая теплота подогретого воздуха:

$$Q_6 = B \cdot L_\alpha \cdot \bar{c}_6 \cdot t_6, \quad (2)$$

где:  $L_\alpha$  – практическое количество воздуха, необходимого для сжигания единицы топлива,

$$L_\alpha = L_0 \cdot \alpha, \quad (3)$$

$$L_\alpha = 9,53 \cdot 1,05 = 10,01 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

$$Q_6 = 0,2 \cdot 10,01 \cdot 1,332 \cdot 200 = 533 \text{ кВт}.$$

Суммарный приход теплоты:

$$Q_{\Sigma \text{Пр}} = Q_x + Q_6 = 7333 \text{ кВт}.$$

*Статьи расхода теплоты.*

Термические печи, выполненные из кирпича и имеющие длительные операции термообработки, обладают низким КПД порядка 0,15...0,3. Данный тепловой баланс составлен только на период подъема температуры, поэтому КПД печи принят  $\eta = 0,35$  (по данным завода).

Теплоту, затрачиваемую на нагрев металла, находим исходя из КПД печи:

$$\eta = \frac{\Delta Q_1}{Q_{\text{Пр}}}, \quad (4)$$

$$\Delta Q_1 = \eta \cdot Q_{\text{Пр}}, \quad (5)$$

$$\Delta Q_1 = 0,35 \cdot 7333,33 = 2566 \text{ кВт}.$$

Теплота, теряемая с отходящими газами:

$$Q_2 = B \cdot V_\alpha \cdot t_{\text{yx.г}}, \quad (6)$$

где:  $V_\alpha$  – практический выход продуктов сгорания от сжигания единицы топлива с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ .

$$V_\alpha = L_\alpha + \Delta V, \quad (7)$$

$$V_\alpha = 10,01 + 1,0 = 11,01 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

$$Q_2 = 0,2 \cdot 11,01 \cdot 1213 = 2670 \text{ кВт}.$$

Потери теплоты с аккумуляцией кладкой и теплопроводностью через футеровку определим по разности между приходом теплоты и известными статьями расхода.

$$Q_{5+6} = Q_{\text{Пр}} - (\Delta Q_1 + Q_2), \quad (8)$$

$$Q_{5+6} = 7333,33 - (2566,67 + 2670,67) = 2096 \text{ кВт}.$$

Структура теплового баланса печи, выполненной по старой технологии представлена в табл. 1.

Таблица 1

Структура теплового баланса термической печи

Приход	%	Расход	%
Химическая теплота топлива – $Q_x$	92,73	Теплота на нагрев металла – $\Delta Q_1$	35
Физическая теплота подогретого воздуха – $Q_6$	7,27	Теплота, теряемая с отходящими газами – $Q_2$	36,42

		Теплота, теряемая теплопроводностью через кладку и на аккумуляцию тепла ей – $Q_{5r}+Q_6$	28,58
Суммарный приход теплоты	100	Суммарный расход теплоты	100

Если известна величина  $\Delta Q_1$ , то:

$$\Delta Q_1 = P_m \cdot \bar{c}_m \cdot (t_{m,кон} - t_{m,нач}). \quad (9)$$

$$P_m = \frac{\Delta Q_1}{\bar{c}_m \cdot (t_{m,кон} - t_{m,нач})} = \frac{2566}{0,857(930 - 650)} = 10,7 \text{ кг/с}.$$

$$\bar{c}_m = \frac{c_{m,кон} \cdot t_{m,кон} - c_{m,нач} \cdot t_{m,нач}}{t_{m,кон} - t_{m,нач}} = \frac{0,688 \cdot 930 - 0,616 \cdot 650}{930 - 650} = 0,857 \text{ кДж/кгК}. \quad (10)$$

Удельный расход условного топлива:

$$b = \frac{B \cdot Q_p^H}{29,31 \cdot P_m}, \quad (10a)$$

$$b = \frac{0,2 \cdot 34000}{29,31 \cdot 10,7} = 21 \text{ кг.у.т./т}.$$

Значение удельного расхода топлива рассчитано для интервала нагрева поковок от 650 до 930 °С.

Время нагрева поковок:

$$\tau = \frac{t_{кон} - t_{нач}}{\omega_{нагр}} = \frac{640 - 400}{280} = 4,3 \text{ ч}, \text{ или } 15480 \text{ с}.$$

Тогда масса садки:

$$G_m = P_m \cdot \tau = 10,7 \cdot 15480 = 165636 \text{ кг}.$$

Современная технология строительства печи включает замену футеровки из кирпича на Z-блоки из огнеупорного волокна. Горелочные устройства заменены на современные, скоростные рекуперативного типа. Конструкция пода останется неизменной – выкатной с песочными затворами. Применение футеровки из огнеупорного волокна позволяет выполнить переднюю стенку печи в виде парашута,двигающегося вместе с выкатным подом.

Расчет теплового баланса печи выполнен с учетом максимальной садки 200 т и максимальной скорости подъема температуры 65 °С/ч. В результате расчета определен максимальный расход природного газа при разогреве печи с садкой до температуры 930 °С, после чего следует выдержка металла в печи, устанавливаемая технологами завода. Для расчета использовались следующие исходные данные:

Теплота сгорания природного газа:  $Q_p^H = 34000 \text{ кДж/м}^3$ .

Коэффициент избытка воздуха:  $\alpha = 1,05$ .

Средняя температура подогрева воздуха:  $t_b = 330 \text{ °С}$ .

Теплоемкость подогретого воздуха:  $C_b = 1,32 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$ .

Средняя температура отходящих газов:  $t_{yx,г} = 810 \text{ °С}$ .

Энтальпия отходящих газов:  $i_{yx,г} = 1213 \text{ кДж/м}^3$ .

Теоретическое количество воздуха, необходимого для сжигания единицы топлива:  $L_0 = 9,53 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Разность между объемами продуктов сгорания и воздуха:  $\Delta V = 1,0$ .

Начальная температура металла:  $t_{m,нач} = 650 \text{ °С}$ .

Теплоемкость металла при  $t_{m,нач}$ :  $\bar{c}_{m,нач} = 0,616 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$ .

Конечная температура металла:  $t_{m,кон} = 930 \text{ °С}$ .

Теплоемкость металла при  $t_{m,кон}$ :  $\bar{c}_{m,кон} = 0,688 \text{ кДж/(м}^3\text{К)}$ .

Масса садки:  $m = 200\,000 \text{ кг}$ .

Скорость нагрева:  $65\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ .

Время нагрева:  $\tau = 4,3\text{ ч}$ .

Производительность печи без учета выдержки:  $P_m = 12,04\text{ кг/с}$ .

Средняя температура внутренней поверхности футеровки:  $t_{\text{вн.ф}} = 810\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Средняя температура наружной поверхности футеровки:  $t_{\text{нар.ф}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Средняя температура наружной поверхности пода:  $t_{\text{нар.под}} = 108\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Толщина футеровки стен и свода:  $S = 0,30\text{ м}$ .

Площадь наружной поверхности футеровки стен и свода:  $F_{\text{вол}} = 152,1\text{ м}^2$ .

Площадь наружной поверхности пода печи:  $F_{\text{под}} = 36\text{ м}^2$ .

Коэффициент теплопроводности волокна  $\lambda_{\text{вол}} = 0,15\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ .

Коэффициент теплопроводности кирпичей пода  $\lambda_{\text{под}} = 0,637\text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ .

Масса волокнистой футеровки стен и свода печи  $G_{\text{вол}} = 16\,720\text{ кг}$ .

Масса футеровки пода печи  $G_{\text{под}} = 31\,125\text{ кг}$ .

Средняя теплоемкость волокнистой футеровки печи  $\bar{c}_{\text{вол}} = 1,047\text{ кДж/(кгK)}$ .

Средняя теплоемкость футеровки пода печи  $\bar{c}_{\text{под}} = 0,87\text{ кДж/(кгK)}$ .

Средняя по массе конечная температура волокнистой футеровки печи  $\bar{t}_{\text{ф.кон}} = 487\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Средняя по массе конечная температура футеровки пода печи  $\bar{t}_{\text{ф.п}} = 529\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Средняя начальная температура волокнистой футеровки  $t_{\text{ф.нач}} = 347\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Начальная температура футеровки пода  $t_{\text{ф.п.нач}} = 379\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Далее представлен расчет теплового баланса печи.

*Статьи прихода теплоты*

Химическая теплота топлива:

$$Q_x = B \cdot Q_n^p = B \cdot 34000\text{ кВт},$$

где  $B$  – расход топлива,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Физическую теплоту подогретого воздуха определяют по формуле (2), практическое количество воздуха, необходимого для сжигания единицы топлива – по формуле (3):

$$Q_b = B \cdot 10,01 \cdot 1,32 \cdot 331\text{ кВт} = B \cdot 4374\text{ кВт}.$$

*Статьи расхода теплоты*

Теплота, затрачиваемая на нагрев металла определяется по формуле (9), где  $\bar{c}_m$  – средняя теплоемкость металла рассчитывается по формуле (10):

$$\Delta Q_1 = 12,04 \cdot 0,857 \cdot (930 - 650) = 2888\text{ кВт}.$$

Потери теплоты с отходящими газами рассчитываются по формулам (6), (7):

$$Q_2 = B \cdot 11,01 \cdot 1213 = B \cdot 13355\text{ кВт}.$$

Потери теплоты теплопроводностью:

$$Q_5 = Q_{5\text{вол}} + Q_{5\text{под}}, \quad (11)$$

где:  $Q_{5\text{вол}}$  – потери теплоты теплопроводностью футеровкой печи,

$Q_{5\text{под}}$  – потери теплоты теплопроводностью футеровкой пода печи.

$$Q_{5\text{вол}} = \frac{(\bar{t}_{\text{вн.ф}} - \bar{t}_{\text{нар.ф}}) \cdot F_{\text{вол}} \cdot 0,001}{\left(\frac{S}{\lambda_{\text{вол}}}\right)}, \quad (12)$$
$$Q_{5\text{вол}} = \frac{[(790 - 45) \cdot 152,1 \cdot 0,001]}{\left(\frac{0,30}{0,15}\right)} = 57\text{ кВт},$$

$$Q_{5\text{вол}} = \frac{(\bar{t}_{\text{вн.ф}} - \bar{t}_{\text{нар.под}}) \cdot F_{\text{под}} \cdot 0,001}{\left(\frac{S}{\lambda_{\text{под}}}\right)}, \quad (13)$$

$$Q_{5\text{под}} = \frac{[(790 - 108) \cdot 36 \cdot 0,001]}{\left(\frac{0,524}{0,637}\right)} = 30 \text{ кВт}.$$

$$Q_5 = 57 + 30 = 87 \text{ кВт}.$$

Аккумуляция теплоты футеровкой печи:

$$Q_6 = Q_{6\text{вол}} + Q_{6\text{под}}, \quad (14)$$

$$Q_{6\text{вол}} = \left[ \frac{G_{\text{вол}}}{\tau \cdot 3600} \right] \cdot \bar{c}_{\text{вол}} \cdot (\bar{t}_{\text{ф.кон}} - t_{\text{ф.нач}}), \quad (15)$$

$$Q_{6\text{вол}} = \frac{16720}{4,3 \cdot 3600} \cdot 1,047 \cdot (487 - 347) = 158 \text{ кВт}.$$

$$Q_{6\text{под}} = \left[ \frac{G_{\text{под}}}{\tau \cdot 3600} \right] \cdot \bar{c}_{\text{под}} \cdot (\bar{t}_{\text{ф.п.кон}} - t_{\text{ф.п.нач}}), \quad (16)$$

$$Q_{6\text{под}} = \left[ \frac{31125}{4,3 \cdot 3600} \right] \cdot 0,87 \cdot (529 - 379) = 262 \text{ кВт}.$$

$$Q_6 = 158 + 262 = 420 \text{ кВт}.$$

Уравнение теплового баланса.

$$B \cdot 34000 + B \cdot 4374 = 2888 + B \cdot 13355 + 87 + 420$$

$$B = \frac{2888 + 87 + 420}{34000 + 4374 - 13355} = \frac{3399,98}{25039,5} = 0,136 \text{ м}^3 / \text{с}, \text{ или } 488 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Структура теплового баланса модернизированной печи представлена в табл. 2.

Таблица 2

Тепловой баланс печи, выполненной по новой технологии:

Приход	%	Расход	%
Химическая теплота топлива – $Q_x$	88,57	Теплота на нагрев металла – $\Delta Q_1$	55,42
Физическая теплота подогретого воздуха – $Q_v$	11,43	Теплота, теряемая с отходящими газами – $Q_2$	34,85
		Теплота, теряемая теплопроводностью через кладку и на аккумуляцию тепла ей – $Q_{5\text{т}} + Q_6$	9,73
Суммарный приход теплоты	100	Суммарный расход теплоты	100

Удельный расход условного топлива:

$$b = \frac{B \cdot Q_n^p}{29,31 \cdot P_m} = \frac{0,135 \cdot 34000}{29,31 \cdot 12,04} = 13 \text{ кг у.т./т}.$$

Коэффициент полезного действия печи:

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{\Delta Q_m}{Q_{\text{прих}}} \cdot 100 = \frac{2888,58}{5181,95} \cdot 100 = 56\%.$$

Таким образом, применение современных технологий строительства печей позволяет уменьшить удельный расход условного топлива на 38 %, увеличить КПД печи на 60 %, увеличить производительность печи на 12,5 %. Применение современных скоростных

горелок рекуперативного типа позволит отказаться от выдержек для выравнивания температур по поверхности поковки, в результате чего возможно дополнительное увеличение производительности печи.

#### **Список использованных источников**

1. *Китаев Б.И.* Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин и [др.]. М.: Металлургия. 528 с.
2. *Казяев М.Д.* Основы теории теплогенерации / М.Д. Казяев, С.Н. Гущин, В.И. Лобанов и [др.]. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 288 с.

### **ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ РЕЛЬСОВЫХ НАКЛАДОК В УСТРОЙСТВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

**© М.В. Старцева, Ю.Г. Ярошенко, 2012**

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург,*

**© Ю.И. Липунов, 2012**

*ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт  
металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), г. Екатеринбург*

Одними из важнейших элементов железнодорожного полотна, во многом «отвечающих» за его надежность, являются рельсовые скрепления и соединения. Они представляют собой ряд изделий, обеспечивающих непрерывность рельсовой нити и ее фиксацию. Известно, что до 30 % нарушений целостности железнодорожного пути происходит в стыковых соединениях [1]. В рельсовом стыке (рис. 1) нарушается однородность пути, в результате чего при прохождении поездов возникают дополнительные динамические воздействия на путь. Путь в стыках расстраивается и изнашивается быстрее, чем в середине звена. Именно поэтому столь важно обеспечить высокие механические характеристики стыковых скреплений. К важнейшему виду стыковых скреплений относятся рельсовые накладки. В России для рельсов современных типов применяются простые по форме двухголовые накладки, причем в 2004 г. на дорогах в пути лежали в основном рельсы, а соответственно и накладки, марок Р65 в объеме 94,3 % и Р50 в объеме 3,5 % [2]. По существующей в настоящее время технологии накладки изготавливаются из стали БСт6сп и подвергаются закалке в баке с маслом. При объемной закалке в масле отсутствует возможность регулирования процесса охлаждения в течение всего цикла, и имеются одинаковые условия охлаждения разномассивных элементов. Вследствие этого возникает неоднородность структуры и механических свойств, большая вероятность коробления при закалке накладок, кроме того, высокая пожароопасность, вредные условия труда, ухудшение экологии, сложность регенерации масла и т.д.