

УДК 621.3.036

**К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ НАГРЕВАНИЯ СТЕНКИ
ЭЛЕМЕНТА ПОВЕРХНОСТИ МОДУЛЬНОГО
ПРОМЫШЛЕННОГО РЕКУПЕРАТОРА ПЕЧЕЙ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ И АВТОТРАКТОРНЫХ ЗАВОДОВ**

Магистр ШИДЛОВСКИЙ В. В.

Белорусский национальный технический университет

Температура стенки элемента поверхности теплообмена чугунного рекуператора зависит от температуры дымовых газов, омывающих эту поверхность, и в свою очередь позволяет оценить величину предела упругости и область упругого или упруго-пластичного состояния материала, соответствующую рабочей температуре стенки. Напряжения в материале являются функцией градиента температур и состояния материала (упругая, упруго-пластическая, пластическая). Поэтому для правильного представления о характере изменения внутренних напряжений необходимо рассмотрение их изменения в конкретных условиях, т. е. для определенного материала. Рассмотрим в качестве такого материала чугун марок СЧ21-40 и ЖЧСШ-7.0.

Под действием внешнего усилия или внутренних напряжений, возникающих как следствие температурных градиентов в жестко закрепленной стенке элемента поверхности теплообмена, в объеме чугуна происходят упругие (упруго-пластические) деформации. Если чугунный образец подвергать растяжению и затем снимать нагрузку, то кривые «усилие – деформация» вследствие явления аккомодации вскоре представятся в виде стабилизированных циклов [1]. Такое же явление будет иметь место и при деформации рабочей (горячей) поверхности стенки чугунного элемента рекуператора при изменении температурного градиента, хотя при этом кривая «усилие – деформация» заменится линией «температура – деформация». В свете сказанного важное значение приобретают скорость роста температуры горячей поверхности промышленного рекуператора и температура этой поверхности, обогреваемой продуктами сгорания, покидающими рабочее пространство нагревательной печи.

Температура продуктов сгорания, которые покидают нагревательную печь (ковка, штамповка, прокатка), составляет величину порядка 750–850 °С ($t_{д.г} = 750–850$ °С). В результате теплообмена с поверхностью устройства для регенеративного теплоиспользования эта температура снижается до $t'_{д.г}$. Между температурами газов на входе и выходе из рекуператора существует жесткая взаимосвязь

$$t'_{д.г} = t_{д.г} - \frac{t''_{в.о} - t'_{в.о}}{\eta \frac{W_{д.г}}{W_{в.о}}}, \quad (1)$$

где $t''_{в.о.}$, $t'_{в.о.}$ – соответственно температуры воздуха-окислителя на выходе и входе из воздухоподогревателя, °С; η – коэффициент удержания теплоты (определяется качеством тепловой изоляции рекуператора), $\eta = 0,8-0,95$; $w_{д.г.}$, $w_{в.о.}$ – водяные эквиваленты продуктов сгорания органического топлива и нагреваемого воздуха, $w = V c'_p$ (V – секундный расход теплоносителя, м³/с; c'_p – объемная изобарная теплоемкость энергоносителя, кДж/(м³·К)).

Зная температуры дымовых газов ($t_{д.г.}$ и $t'_{д.г.}$) в области рекуператора, а также значения коэффициентов теплоотдачи на холодной и горячей стороне поверхности, разделяющей теплоносители $\alpha^{д.г.} = \alpha^{д.г.}_{изл} + \alpha^{д.г.}_к$ (рис. 1) и $\alpha^в = \alpha^в_к$, можно рассчитать температуру стенки в направлении потока теплоты $t^{x_1 экв}_{ст}$ и $t^{x_2 экв}_{ст}$ (рис. 1) и ее среднюю температуру, а затем – время нагревания горячей поверхности до рабочей температуры $t^{x_1 экв}_{ст}$ [2, 3]. Принимая средние значения $\alpha^{д.г.} \approx 250$ и $\alpha^в \approx 50$ Вт/(м²·К), используем выражения:

$$t^{x_1 экв}_{ст} = \bar{t}_{д.г.} - \frac{k(\bar{t}_{д.г.} - \bar{t}_в)}{\alpha^{д.г.}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (2)$$

$$t^{x_2 экв}_{ст} = \bar{t}_в + \frac{k(\bar{t}_{д.г.} - \bar{t}_в)}{\alpha^в}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где $t^{x_1 экв}_{ст}$, $t^{x_2 экв}_{ст}$ – искомые температуры стенки (рис. 1), °С; $\bar{t}_{д.г.}$, $\bar{t}_в$ – средние температуры продуктов сгорания и подогреваемого воздуха в области поверхности теплообмена, °С; k – коэффициент теплопередачи,

$k = \frac{\alpha^{д.г.} \alpha^в}{\alpha^{д.г.} + \alpha^в}$, Вт/(м²·К), можно рассчитать $t^{x_1 экв}_{ст}$ и $t^{x_2 экв}_{ст}$.

Для оценки времени нагревания рабочей поверхности элемента рекуператора классифицируем задачу о теплообмене. С некоторым допущением задача классифицируется как одномерная (плоская стенка) с постоянными теплофизическими характеристиками ($a = 0,02$ м²/ч; $\lambda = 30$ Вт/(м·К) [4])

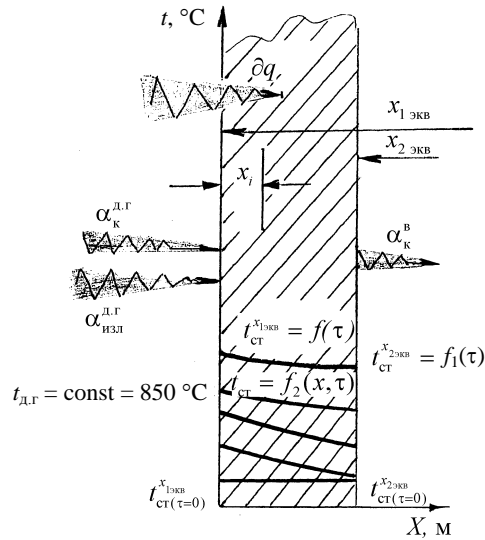


Рис. 1. Расчетная схема теплообмена в элементе игольчатого рекуператора М-I и М-II

и односторонним (несимметричным) нагревом. Теплопроводность в стенке (нестационарная теплопроводность) для $t_{д.г} = \text{const}$ описывается следующим образом:

$$Fo = F \left[\left(\frac{\vartheta_{\tau}}{\vartheta_0} \right); Bi; \frac{x_i}{x} \right]; \quad Fo = F_1 \left[\left(\frac{\vartheta_{\tau}}{\vartheta_0} \right)^{x_{1\text{экв}}}; Bi \right];$$

$$Fo = F_2 \left[\left(\frac{\vartheta_{\tau}}{\vartheta_0} \right)^{x_{2\text{экв}}}; Bi \right], \quad (3)$$

где $Fo = F_1 \left[\left(\frac{\vartheta_{\tau}}{\vartheta_0} \right)^{x_{1\text{экв}}}; Bi \right]$ – записано для рабочей поверхности элемента рекуператора.

Однозначность функции F_2 в (3) может быть установлена путем использования номограммы рис. 2.

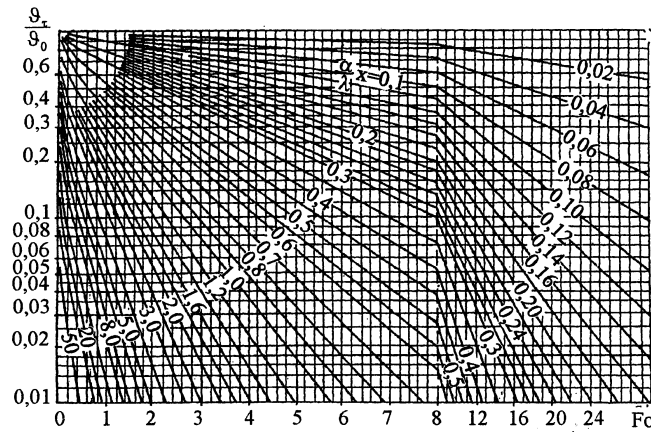


Рис. 2. Температурный критерий для поверхности пластины

Напоминаем, что в области рекуператора температура дымовых газов колеблется от $t_{д.г}$ до $t'_{д.г}$ и в среднем составляет 750–850 °С, $\alpha^{д.г} \approx \approx 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

При фиксированных значениях: $\bar{t}_{д.г} \approx 850 \text{ °С}$; $\bar{\alpha}_{д.г} \approx 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $t_{ст}^{x_{1\text{экв}}} \approx 700 \text{ °С}$; $\lambda = 30 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ и $a = 0,02 \text{ м}^2/\text{ч}$ выполним расчет времени нагрева рабочей поверхности стенки до $t_{ст}^{x_{1\text{экв}}} \approx 700 \text{ °С}$. Принимаем толщину стенки равной 20 мм (0,02 м).

Находим число Би и безразмерную относительную температуру:

$$Bi = \frac{\bar{\alpha}_{д.г} \cdot x}{\lambda}; \quad Bi = \frac{250 \cdot 0,02}{30} = 0,17;$$

$$\left(\frac{\vartheta_{\tau}}{\vartheta_0}\right)^{X_{1\text{экв}}} = \frac{\bar{t}_{\text{д.г}} - t_{\text{ст}}^{X_{1\text{экв}}}}{\bar{t}_{\text{д.г}} - t_{\text{ст}}^{X_{1\text{экв}}(\tau=0)}};$$

$$\left(\frac{\vartheta_{\tau}}{\vartheta_0}\right)^{X_{1\text{экв}}} = \frac{850 - 700}{850 - 20} = 0,18.$$

Используя зависимость $Fo = F\left[\left(\frac{\vartheta_{\tau}}{\vartheta_0}\right)^{X_{1\text{экв}}}; Bi\right]$ (рис. 2), находим чис-

ло Fo . Имеем $Fo = 14$.

Находим время разогрева рабочей поверхности до температуры $t_{\text{ст}}^{X_{1\text{экв}}} = 700 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\tau_{t_{\text{ст}}=700 \text{ }^{\circ}\text{C}}^{X_{1\text{экв}}} = 0,28 \text{ ч, или } \tau_{t_{\text{ст}}=700 \text{ }^{\circ}\text{C}}^{X_{1\text{экв}}} = 17 \text{ мин.}$$

Тогда скорость разогрева составит

$$c = \frac{700}{17} \approx 40 \text{ }^{\circ}\text{C/мин.}$$

ВЫВОД

При запуске рекуператора в работу скорость разогрева стенки не должна превышать величину порядка $50 \text{ }^{\circ}\text{C/мин}$. С этой целью запуск нагревательного устройства в рабочий режим необходимо осуществлять при перепуске отходящих продуктов сгорания, минуя рекуператор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коцюбинский, О. Ю. Пластичность чугуна при повышенных температурах / О. Ю. Коцюбинский // Литейное производство. – 1958. – № 8.
2. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. – Ч. 1 / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2009.
3. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. – Ч. 2 / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2009.
4. Тебеньков, Б. П. Рекуператоры для промышленных печей / Б. П. Тебеньков. – М.: Металлургия, 1967.

Представлена кафедрой ПТЭ и Т

Поступила 11.11.2009