К оценке прочностных свойств футеровки доменного воздухонагревателя

И.Г. Бянкин, С.В. Симиниченко, Ю.Л. Стуканёв, Н.В. Шушунов

При проведении экспертизы промышленной безопасности доменных воздухонагревателей используется «Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей» [1], предусматривающая визуальную и инструментальную оценку технического состояния только кожуха аппарата.

Однако, как подчеркивают сами разработчики методики: «Конструкционная прочность и надежность … воздухонагревателей обеспечивается правильным подбором … температуры и давления дутья, … физико-механических свойств материалов футеровки, … постоянством технологического режима, своевременным выполнением капитальных и текущих ремонтов агрегата. Недостаточная степень контроля в процессе эксплуатации фактического состояния кожуха агрегата из-за отсутствия вмонтированных средств контроля температуры и расчетной нагрузки не обеспечивает гарантийной надежности …».

В соответствии с этими положениями конструкционную прочность и надежность воздухонагревателя в целом невозможно обеспечить без сохранения прочностных свойств футеровки. Правильная конструкция футеровки и качество ее сооружения определяют многое, но не гарантируют ресурс работоспособного состояния воздухонагревателей – 25-30 лет [1].

На прочностные свойства футеровки влияет её напряженно-деформированное состояние, зависящее не только от конструкции кладки, но и в значительной степени от режима её эксплуатации (температура и продолжительность нагрева насадки) в наиболее высокотемпературной зоне аппарата – подкупольном пространстве.

При оценке условий эксплуатации футеровки купола следует учитывать специфику измерения температуры в подкупольном пространстве, которая связана с тем, что купольная термопара воспринимает не только тепловой поток излучением от нагретой внутренней поверхности футеровки и верхнего торца камеры насадки, но и конвективный тепловой поток от газов, имеет место и теплоотвод по футляру термопары. Оценку точности показаний в таких условиях выполнить достаточно сложно, что наряду с погрешностью самого датчика способно привести к значительному несоответствию реальной и измеренной температуры купола.

Очевидный (и самый простой) выход из этой ситуации – поддерживать уровень температуры купола заведомо более низким, чем это допустимо по прочностным свойствам огнеупорной кладки. Однако в этом случае значительно снижается как уровень температуры нагрева доменного дутья, так и эффективность его нагрева, что приводит к экономическим потерям, связанным с перерасходом кокса и падением производительности доменной печи.

В связи с вышеизложенным определенный интерес вызывает оценка влияния повышения температуры купола (как из-за методической и систематической погрешностей термодатчика, так и ошибок регулирования системы автоматики или персонала) на прочностные свойства огнеупорной футеровки, состоящей из отдельных элементов (кирпичей) и связующего их мертеля швов.

Рассмотрим в общей постановке задачу нагрева воздухонагревателя при повышенной температуре купола с целью определения допустимого закона ее изменения, при котором обеспечивается та же величина деформации ползучести огнеупоров кладки, что и при нагреве аппарата с постоянной температурой купола.

Повышение температуры купола воздухонагревателя приводит к увеличению радиального σ_r и окружного σ_φ термонапряжений, под действием которых возможно разрушение тела кирпича, и к увеличению деформации ползучести (крипа) огнеупоров ε.

Считая $\sigma_T >> \sigma_\varphi$, будем принимать во внимание только изменение окружного напряжения, обозначив его $\sigma = \sigma_\varphi$.

Наиболее подвержена разрушению внутренняя поверхность футеровки купола радиусом r_0, где напряжение σ максимально, а, следовательно, и максимальна деформация ползучести (крип). При некотором значении радиуса r^* имеется поверхность нулевого уровня напряжения, где $\sigma = 0$. Причем значениям $r_0 \le r < r^*$ соответствует зона сжимающего напряжения, а при $r > r^*$действует растягивающее напряжение. Изменение температуры внутренней поверхности кладки купола (при $r = r_0$) приводит к соответственному изменению не только окружного напряжения σ, но и к смещению нулевого уровня, то есть к изменению длины зоны обжатия кирпичей, равной ($r^* - r_0$).

При постоянной температуре купола T_0 возникает окружное напряжение σ_0, деформация мертеля швов за время нагрева воздухонагревателя τ_H составит величину $\Delta\delta_0$, а деформация ползучести кирпичей – ε_0.

В случае изменения температуры купола в процессе нагрева воздухонагревателя будут изменяться во времени окружное напряжение σ_1, деформация мертеля $\Delta\delta_1$, а к концу периода нагрева деформация ползучести станет равной ε_1.

Считая, что изменение температуры купола не приведет к чрезмерным, то есть разрушающим окружным напряжениям, определим условия, при которых деформация при повышенной температуре не превысит значение, соответствующее режиму с постоянной температурой купола, т.е. $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$.

В работах [2, 3] предложено определять деформацию огнеупоров на основе упруговязкопластической модели по зависимости

$$\varepsilon = A\left\{\sigma^2 \tau \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)\right\}^m, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \Delta l / l$ - деформация ползучести за время τ; - линейный размер кирпича, м; Δl - изменение линейного размера за время τ, м; A -постоянный для каждого вида огнеупора коэффициент; σ - напряжение, Па; Q - кажущаяся энергия активации ползучести, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль×К); T - температура, К; m -показатель степени, характерный для каждого вида материала *(0<m<1)*.

В найденном ранее решении [4] зависимость (1) использовалась для переменной во времени величины напряженияs, что не совсем оправдано. В самом деле, величина напряжения, как функция температуры и времени, определяется в общем случае выражением [5]:

$$\sigma(T,\tau) = E\left\{\alpha(T - T^*) - \frac{N}{\pi r_0}\Delta\delta(T,\tau)\right\}, \quad (2)$$

где *E, a* - модуль упругости и коэффициент линейного температурного расширения кирпичей кладки, Па, ; T^* - температура футеровки при $r = r^*$, К; N - количество швов кладки в окружном направлении.

Считая мертель линейной вязкоупругой средой наследственного типа, деформацию мертеля $\Delta\delta$ записываем в соответствии с [6] (при постоянной температуре и переменной нагрузке)

$$\frac{\Delta\delta(\tau)}{\delta_0} = \frac{\sigma(\tau)}{E_0} + \frac{C}{E_0}\exp\left[-\frac{Q_м}{RT}(1-\beta)\right]\int_0^\tau \frac{\sigma(t)dt}{(\tau - t)^{1-\beta}}, \quad (3)$$

где δ_0 - начальная толщина шва, м; E_0 - модуль общей деформации мертеля, Па; τ - текущее время, с; C, β - постоянные коэффициенты $(0<b<1)$; Q_M - кажущаяся энергия активации ползучести мертеля, Дж/моль; σ - действующая на момент времени τ нагрузка, Па.1

Таким образом, в процессе эксплуатации кладки напряжение нельзя рассматривать как величину постоянную (даже при постоянной температуре), так как она изменяется не только за счет изменения температуры, но и за счет деформации мертеля швов.

В этом случае более адекватным подходом будет использование принципа наложения [7], в соответствии с которым общая деформация будет суммой деформаций за все интервалы времени, в течение которых напряжения и температуры будут «почти» постоянными (мало изменяющимися), и в каждом интервале времени не будет зависеть от напряжений, действующих в другое время.

Периодические колебания температуры по толщине первого слоя футеровки купола и связанная с этим существенная неравномерность температурного поля вызывают появление изменяющихся во времени окружных термонапряжений в теле кирпичей кладки, величина которых определяется по зависимости [7]:

$$\sigma(r)=\frac{E\alpha}{1-\mu}\left\{T(r)-T_{cp}-zT_M\right\}, \tag{4}$$

где μ - коэффициент Пуассона; $\delta_ф$ - толщина слоя футеровки, м; r_0, r -внутренний и текущий радиус слоя, м; $z = r-r_0-\delta_ф/2$; $T(r)$ - температура по толщине слоя, К; T_{cp} - средняя по толщине слоя температура, К; T_M - температура, эквивалентная действию изгибающего момента сил, К/м.

При этом

$$T_{cp}=\frac{1}{\delta_ф}\int_{-\delta_ф/2}^{\delta_ф/2}T(z)dz\,;T_M=\frac{12}{\delta_ф^3}\int_{-\delta_ф/2}^{\delta_ф/2}z\,T(z)dz\,. \tag{5}$$

Разделим время периода нагрева насадки воздухонагревателя τ_H на интервалы равной продолжительности $\Delta\tau$ так, чтобы в каждом из них можно было допустить постоянство температуры и напряжений.

Тогда суммарная деформация огнеупоров кладки, определяемая из соотношения (1) может быть определена по зависимости:

$$\varepsilon=A(\Delta\tau)^m\sum_{i=1}^{n}\sigma^{2m}(i\Delta\tau)\exp\left(-\frac{Qm}{RT_i}\right), \tag{6}$$

где i - номер временного отрезка; $n = \tau_H/\Delta\tau$ - количество временных отрезков.

Уравнение (3) с учетом $\tau = i\Delta\tau$ преобразуется к виду

$$\Delta\delta(i\Delta\tau)=\frac{\delta_0}{E_0}\left\{\sigma(i\Delta\tau)+C\exp\left[-\frac{Q_м}{RT_i}(1-\beta)\right]\sum_{j=1}^{i}\sigma(j\Delta\tau)\int_{(j-1)\Delta\tau}^{j\Delta\tau}\frac{dt}{(i\Delta\tau-t)^{1-\beta}}\right\}, \tag{7}$$

а после интегрирования под знаком суммы

$$\Delta\delta(i\Delta\tau)=\frac{\delta_0}{E_0}\left\{\sigma(i\Delta\tau)\left[1+\frac{C}{\beta}(\Delta\tau)^\beta\exp\left(-\frac{Q_м(1-\beta)}{RT_i}\right)\right]+\right.$$
$$\left.+\frac{C(\Delta\tau)^\beta}{\beta}\exp\left(-\frac{Q_м(1-\beta)}{RT_i}\right)\sum_{j=1}^{i-1}\sigma(j\Delta\tau)\left[(i-j+1)^\beta-(i-j)^\beta\right]\right\} \tag{8}$$

Напряжение, возникающее в каждый i-й интервал времени, в соответствии с (2) определяется по зависимости:

$$\sigma(i\Delta\tau) = E\left\{\alpha(T_i - T_i{*}) - \frac{N}{\pi r_0}\Delta\delta(i\Delta\tau)\right\}. \tag{9}$$

Таким образом, совместное решение уравнений (6), (8) и (9) позволяет определить для каждого временного интервала деформацию мертеля $\Delta\delta$, напряжение σ и деформацию кирпичей кладки при заданном законе изменения температуры купола T_i.

При традиционном способе нагрева воздухонагревателя с постоянной температурой купола неизменность последней имеет место только спустя некоторое время τ_p, необходимое для разогрева подкупольного пространства после периода охлаждения насадки.

Тепловая инерционность наблюдается и при изменении температуры по какому-либо закону. Поскольку изменение температуры купола происходит не скачком, а «медленно», то при уменьшении температуры термонапряжения на внутренней поверхности купола не могут считаться пренебрежимо малыми, как в «идеальной» модели [4].

На основании вышеизложенного представим закон изменения температуры купола функцией вида

$$T(\tau) = \begin{cases} T_{охл} + (T_0 - T_{охл})\tau/\tau_p, & при \quad 0 \le \tau \le \tau_p \\ T_0, & при \quad \tau_p < \tau < \tau_1 \\ T_0 + (T_c - T_0)\dfrac{\tau - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1}, & при \quad \tau_1 < \tau < \tau_2 \\ T_c, & при \quad \tau_2 < \tau < \tau_3 \\ T_c + (T_0 - T_c)\dfrac{\tau - \tau_3}{\tau_4 - \tau_3}, & при \quad \tau_3 < \tau < \tau_4 \\ T_0, & при \quad \tau_4 < \tau < \tau_н \end{cases} \tag{10}$$

То есть зависимостью (10) аппроксимируем практическую реализацию изменения температуры купола, при котором в течение времени τ_p от начала нагрева происходит разогрев футеровки от температуры кладки в конце охлаждения аппарата $T_{охл}$ до основного уровня температуры купола, затем в течение времени (τ_1-τ_p) нагрев осуществляется с постоянной температурой купола T_0. Начиная с момента τ_1 и до τ_2, осуществляется подъем температуры до уровня T_c, этот уровень поддерживается в течение времени (τ_3-τ_2), затем опять снижается к моменту времени τ_4 до основного значения T_0, которое сохраняется во все оставшееся время нагрева воздухонагревателя.

При реализации нагрева с постоянной температурой купола изменение последней может быть описано уравнением:

$$T(\tau) = \begin{cases} T_{охл} + (T_0 - T_{охл})\cdot\tau/\tau_p, & при \quad 0 \le \tau \le \tau_p \\ T_0, \quad при \quad \tau_p < \tau \le \tau_н \end{cases} \tag{11}$$

Определение напряженно-деформированного состояния кладки купола при изменении ее температуры по зависимости (11) осуществляется из решения системы уравнений (8) и (9), а суммарная деформация составит

$$\varepsilon_0 = A(\Delta\tau)^m \sum_{i=1}^{i_p} \sigma_0^{2m}(i\Delta\tau)\exp\left(-\frac{Q_m}{RT}\right) + A(\Delta\tau)^m \exp\left(-\frac{Q_m}{RT_0}\right)\sum_{i=i_p+1}^{h} \sigma_0^{2m}(i\Delta\tau). \tag{12}$$

Аналогичная система уравнений имеет место и при расчете НДС с повышением температуры купола до T_c по зависимости (10). В этом случае деформация ползучести в течение нагрева насадки:

$$\varepsilon_1 = A(\Delta\tau)^m \sum_{i=1}^{i_\sigma} \sigma_1^{2m}(i\Delta\tau)\exp\left(-\frac{Q_m}{RT_i}\right) + A(\Delta\tau)^m \exp\left(-\frac{Q_m}{RT_0}\right)\sum_{i=i_\sigma+1}^{i_1}\sigma_1^{2m}(i\Delta\tau) + \\ + A(\Delta\tau)^m \sum_{i=i_1+1}^{i_2} \sigma_1^{2m}(i\Delta\tau)\cdot\exp\left(-\frac{Q_m}{RT_i}\right) + A(\Delta\tau)^m \exp\left(-\frac{Q_m}{RT_c}\right)\sum_{i=i_2+1}^{i_3}\sigma_1^{2m}(i\Delta\tau) + \\ + A(\Delta\tau)^m \sum_{i=i_3+1}^{i_4} \sigma_1^{2m}(i\Delta\tau)\exp\left(-\frac{Q_m}{RT_i}\right) + A(\Delta\tau)^m \exp\left(-\frac{Q_m}{RT_0}\right)\sum_{i=i_4+1}^{n}\sigma_1^{2m}(i\Delta\tau) \quad . \tag{13}$$

В соотношениях (12) и (13) приняты обозначения: $i_p = \tau_p/\Delta\tau$, $i_1 = \tau_1/\Delta\tau$, $i_2 = \tau_2/\Delta\tau$, $i_3 = \tau_3/\Delta\tau$, $i_4 = \tau_4/\Delta\tau$.

При сохранении суммарной деформации в течение нагрева ($\varepsilon_1 = \varepsilon_0$), допуская полное снятие напряжений в поверхностном слое футеровки в течение периода охлаждения насадки, из уравнений (12) и (13) получим уравнение, связывающее параметры τ_1, τ_2, τ_3, τ_4 и T_c:

$$\exp\left(-\frac{Q_m}{RT_0}\right)\sum_{i=i_1+1}^{n}\sigma_0^{2m}(i\Delta\tau) = \sum_{i=i_1+1}^{i_2}\sigma_1^{2m}(i\Delta\tau)\exp\left(-\frac{Q_m}{RT_i}\right) + \exp\left(-\frac{Q_m}{RT_c}\right)\sum_{i=i_2+1}^{i_3}\sigma_1^{2m}(i\Delta\tau) + \\ + \sum_{i=i_3+1}^{i_4}\sigma_1^{2m}(i\Delta\tau)\exp\left(-\frac{Q_m}{RT_i}\right) + \exp\left(-\frac{Q_m}{RT_c}\right)\sum_{i=i_4+1}^{n}\sigma_1^{2m}(i\Delta\tau). \tag{14}$$

Отметим, что уравнение (14) позволяет найти только предельно допустимое соотношение между параметрами режима, при котором величина деформации ползучести огнеупоров футеровки купола при отклонении температуры купола от предельного значения не превысит значения, соответствующего условиям нагрева аппарата с постоянной температурой купола.

Таким образом, предлагаемая методика оценки прочностных свойств футеровки позволяет учесть изменения температуры купола доменного воздухонагревателя в процессе его эксплуатации и, тем самым, повысить качество оценки ресурса эксплуатации аппарата при проведении экспертизы промышленной безопасности.

Библиографический список

1. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей. РД 11-288-99. Утверждена Постановлением Госгортехнадзора России от 2 июня 1999 г. № 35.

2. Вишневский И.И., Ромасько В.С., Смирнова Л.Д. Прогнозирование ползучести огнеупорных материалов на основе упруго-вязкопластической модели // Заводская лаборатория, 1985, №6, с.68-71.

3. Обобщенные диаграммы и пределы ползучести огнеупорных материалов / Вишневский И.И., Смирнова Л.Д., Анисимова Т.А. и др. // Огнеупоры, 1985, №1, с.6-11.

4. Бянкин И.Г. Исследование и оптимизация доменных воздухонагревателей с внутренней камерой горения / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Липецк, 1991, 182 с.

5. Сургучева Е.Л., Шкляр Ф.Р., Фейгин Г.Л. Расчет напряженно-деформированного состояния радиальных стен и кладки камеры горения воздухонагревателя // Проблемы прочности, 1986, №4, с.110-113.

6. Шкляр Ф.Р., Сургучева Е.Л., Торицын Л.Н. Исследование деформационных свойств мертелей // Огнеупоры, 1987, №6, с.24-26.

7. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности // Москва, Высшая школа, 1990, 400 с.