

УДК 621.3.036

## СНИЖЕНИЕ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА В ПЕЧАХ ГАЗОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

Докт. техн. наук, проф. **НЕСЕНЧУК А. П.**,  
инженеры **ФОМЕНКО О. Г.**, **ШКЛОВЧИК Д. И.**,  
канд. техн. наук **РЫЖОВА Т. В.**, инж. **АЙДАРОВА З. Б.**

*Белорусский национальный технический университет*

Материал статьи посвящен мероприятиям, направленным на снижение времени цементации стального изделия в толкательных цементационно-закалочных-отпускных агрегатах типа СТЦА (типоряд СТЦА – 10.100.5/3С1 ... СТЦА – 10.40.5/7С1), разработанных в бывшем СССР во ВНИИТмаше, а также в двухрядных газовых агрегатах для химико-термической обработки. Характеристики этих агрегатов приводятся в [1, 2].

Схема агрегата (цементационно-закалочного-отпускного) газовой цементации с насыпью изделий в поддоны показана на рис. 1.

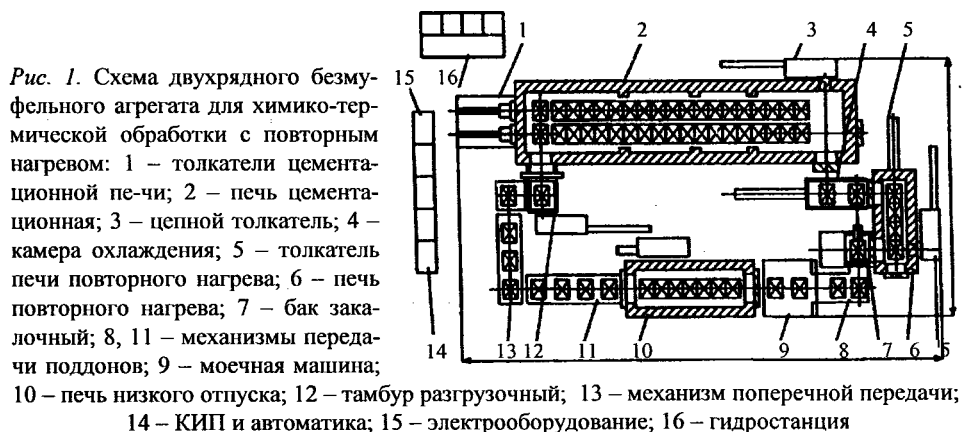


Рис. 1. Схема двухрядного безмуфельного агрегата для химико-термической обработки с повторным нагревом: 1 – толкатели цементационной печи; 2 – печь цементационная; 3 – цепной толкатель; 4 – камера охлаждения; 5 – толкатель печи повторного нагрева; 6 – печь повторного нагрева; 7 – бак закалочный; 8, 11 – механизмы передачи поддонов; 9 – моечная машина; 10 – печь низкого отпуска; 12 – тамбур разгрузочный; 13 – механизм поперечной передачи; 14 – КИП и автоматика; 15 – электрооборудование; 16 – гидростанция

Печь газовой цементации состоит из зоны основного нагрева насыпи до температуры цементации порядка 950 °С и последующих зон цементации, из которых поддон со стальными изделиями (детали или поковки) направляется в печь 6 (подстуживания или подогрева) и закалочный бак.

Как видно из рис. 1, нагрев изделий размерами 120×80×40 мм, их последующая цементация и закалка происходят в поддонах достаточно больших размеров, а следовательно, расчет нагрева насыпи нужно выполнять по размерам поддона в отличие от насыщения углеродом.

Предварительный нагрев (рис. 2) до температуры операции – процесс достаточно длительный и может составить 3...5 ч, что вполне сопоставимо с основным процессом цементации. В качестве примера можно заметить, что насыщение поверхностного слоя углеродом в газовой атмосфере при прикидочных расчетах составляет примерно 1,5 ч на 0,1 мм глубины насыщения. Выполняя насыщение на глубину 6,0 мм, получим величину  $\tau_{\text{нас}}$

$$\tau_{\text{нас}} = 1,5 \cdot 6,0 = 9 \text{ ч.}$$

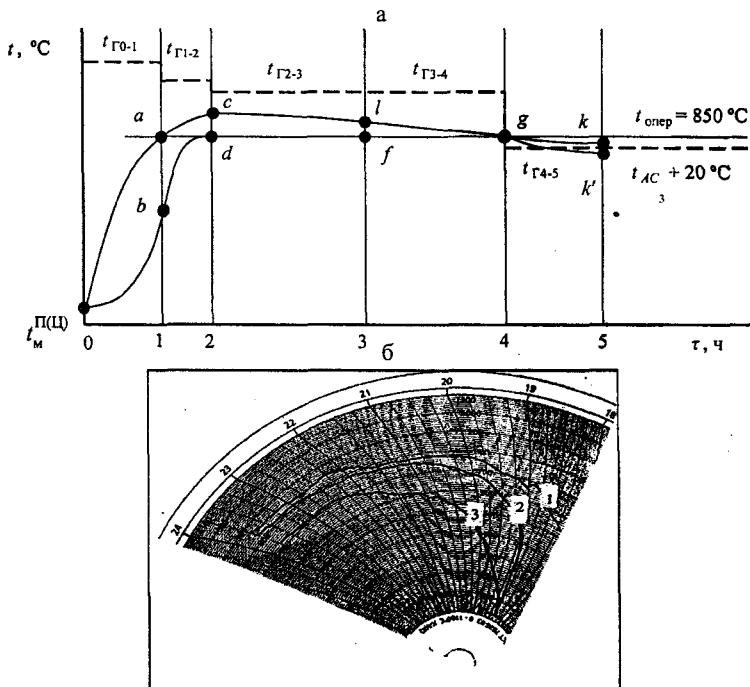


Рис. 2. Температурный график печи газовой цементации: а – температурный график; б – график (примерный) предварительного нагрева между сечениями 0–0 и 1–1; 1...3 – соответственно температуры печи, поверхности и середины насыпи размером  $x = 0,4$  и  $2r = 0,5$  м

Сопоставление времени предварительного подогрева (поверхность и середина насыпи, симметричный нагрев) с  $\tau_{\text{нас}} = 9$  ч подтверждает его ощутимое влияние на характеристики теплотехнологии и удельный расход топлива в цементационном агрегате.

Существенный перегрев поверхности насыпи (большое время предварительного нагрева) усугубляется еще и тем, что она имеет пониженные теплофизические характеристики (порозность насыпи порядка 0,5). Это в свою очередь снижает скорость предварительного подогрева центра металлической садки, а это значит, что камера предварительного подогрева цементационной печи должна иметь зону выдержки, в которой центр догревается до температуры операции.

Нужно иметь в виду, что в случае насыпи в расчетах используются эффективные теплофизические характеристики. Так, для насыпи стальных изделий эффективная теплопроводность рассчитывается

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_m \frac{\lambda'}{1 - (1 - \lambda')(1 - \varepsilon)},$$

где  $\lambda'$  – относительный коэффициент теплопроводности газовой прослойки,

$$\lambda' = \frac{\lambda_r + \alpha's}{\lambda_m}.$$

Расчет нагрева насыпи может выполняться по упрощенным методикам, так как в приведенном материале он используется лишь для сопоставления. Что же касается основных принципов расчета, то они должны быть бесспорно соблюдены (методики для тел произвольной формы – задачи многомерного нагрева и пр.).

В нашем случае будет рассмотрен нагрев составного тела (двумерная задача нагрева цилиндра (насыпи) конечных размеров). При этом в основу расчета может быть положено выражение

$$Fo = F \left[ Bi; \left( \frac{v_r}{v_0} \right)^{\Pi(1)} \right].$$

Нагреваемый в зонах предварительного нагрева цилиндр представляем бесконечной пластиной толщиной  $\delta(x)$ , равной высоте цилиндра, и бесконечным цилиндром диаметром  $d$ .

Для первой зоны предварительного нагрева насыпи ( $x = 0,4$  и  $d = 0,5$  м) находим

$$Bi_1^{(d)} \text{ и } Bi_1^{(x)},$$

где

$$Bi_1^{(d)} = \frac{\alpha_{\text{Iэфф}} d}{\lambda_d} \text{ и } Bi_1^{(x)} = \frac{\alpha_{\text{Iэфф}} x}{\lambda_x}. \quad (1)$$

Здесь  $d$  и  $x$  – соответственно диаметр ( $d = 0,5$  м) и высота поддона с насыпью деталей ( $x = 0,4$  м).

По найденному значению  $Bi_1^{\max}$  определяем величину  $Fo_{\text{Imax}}$ , используя  $\left( \frac{v_r}{v_0} \right)_{Bi_1^{\max}}^{\Pi} = \frac{\bar{t}_r - t_{\text{MMI}}^{\Pi}}{\bar{t}_r - t_{\text{MO}}^{\Pi}}$  и  $Bi_1^{\max}$ .

Также определяем для первой зоны

$$\tau_1^{\max} = \frac{Fo_{\text{Imax}} x_{1Bi_1^{\max}}}{a_1}, \quad (2)$$

где  $x_{1Bi_1^{\max}}$  – характерный размер элементарной формы, дающей максимальное значение  $Bi_1$ .

Отрезок  $\tau_1^{\max}$  следует разбить на пять-шесть равных расчетных промежутков времени:  $\tau_{1,1}$  (первая зона печи),  $\tau_{1,2}$ ,  $\tau_{1,3}$ , ...,  $\tau_{1,6}$ .

Остается для каждой из элементарных (первая зона печи предварительного подогрева короткого цилиндра) ( $x = 0,4$  и  $d = 0,5$  м) определить  $Fo_{1\tau=1,i}$  и

$$\left( \frac{v_{\tau_{1,i}}}{v_0} \right)^{(d)} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,i}}}{v_0} \right)^{(x)}$$

Иными словами, требуется рассчитать для первой зоны и первой формы:

$$Fo_{1\tau_{1,1}}^{(d)} ; Fo_{1\tau_{1,2}}^{(d)} ; Fo_{1\tau_{1,3}}^{(d)} ; \dots ; Fo_{1\tau_{1,6}}^{(d)}$$

Используя номограмму Будрина и  $Bi_1^{(d)}$ , находим:

$$\left( \frac{v_{\tau_{1,1}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Pi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,2}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Pi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,3}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Pi} ; \dots ; \left( \frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Pi}$$

и

$$\left( \frac{v_{\tau_{1,1}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Psi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,2}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Psi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,3}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Psi} ; \dots ; \left( \frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0} \right)_1^{(d)\Psi}$$

Также для второй формы имеем:

$$\left( \frac{v_{\tau_{1,1}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Pi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,2}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Pi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,3}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Pi} ; \dots ; \left( \frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Pi}$$

и

$$\left( \frac{v_{\tau_{1,1}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Psi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,2}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Psi} ; \left( \frac{v_{\tau_{1,3}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Psi} ; \dots ; \left( \frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0} \right)_1^{(x)\Psi}$$

Для всех шести расчетных промежутков времени составного тела  $\tau_{1,1}$ ;  $\tau_{1,2}$ ;  $\tau_{1,3}$ ; ...;  $\tau_{1,6}$  записываем для

$$\Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,1}}}{v_0} \right)_1^{\Pi} ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,2}}}{v_0} \right)_1^{\Pi} ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,3}}}{v_0} \right)_1^{\Pi} ; \dots ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0} \right)_1^{\Pi}$$

и

$$\Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,1}}}{v_0} \right)_1^{\Psi} ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,2}}}{v_0} \right)_1^{\Psi} ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,3}}}{v_0} \right)_1^{\Psi} ; \dots ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0} \right)_1^{\Psi}$$

Для поверхности насыпи ( $x = 0,4$  и  $d = 0,5$  м) записываем:

$$\Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,1}}}{v_0} \right)_1^{\Pi} = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,1}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}} ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,2}}}{v_0} \right)_1^{\Pi} = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,2}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}} ;$$

$$\Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,3}}}{v_0} \right)_1^{\Pi} = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,3}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}} ; \dots ; \Pi \left( \frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0} \right)_1^{\Pi} = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,6}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}} . \quad (3)$$

По аналогии для середины насыпи ( $x = 0,4$  и  $d = 0,5$  м):

$$\Pi\left(\frac{v_{\tau_{11}}}{v_0}\right)_1 = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,1}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}}; \quad \Pi\left(\frac{v_{\tau_{12}}}{v_0}\right)_1 = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,2}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}};$$

$$\Pi\left(\frac{v_{\tau_{13}}}{v_0}\right)_1 = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,3}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}}; \dots; \quad \Pi\left(\frac{v_{\tau_{1,6}}}{v_0}\right)_1 = \frac{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M1\tau_{1,6}}^{\Pi}}{\bar{t}_{\Gamma 1} - t_{M0}^{\Pi}}. \quad (4)$$

Используя (3) и (4) для моментов времени  $\tau_{1,1}; \tau_{1,2}; \tau_{1,3}; \dots; \tau_{1,6}$ , находим  $t_{M1\tau_{1,1}}^{\Pi(Q)}$ ;  $t_{M1\tau_{1,2}}^{\Pi(Q)}$ ;  $t_{M1\tau_{1,3}}^{\Pi(Q)}$ ;  $\dots$ ;  $t_{M1\tau_{1,6}}^{\Pi(Q)}$ .

Теперь могут быть построены графики для первой зоны печи предварительного подогрева  $t_{M1\tau_{1,i}}^{\Pi(Q)} = f(\tau_{1,i})$  и для второй зоны  $t_{M2\tau_{1,i}}^{\Pi(Q)}$ .

Рис. 3 иллюстрирует распределение углерода в поверхностном слое насыщаемого в атмосфере эндогаза слоя  $\delta$  стального изделия, находящегося в насыпи (зоны: (2-2) – (3-3) и (3-3) – (4-4), рис. 2).

В итоге нужно отметить, что сопоставление продолжительности цементации стального изделия в насыпи и поштучно заслуживает серьезного внимания. Изменив структуру посадки при нагреве и насыщении, можно ожидать снижения удельного расхода топлива в такой теплотехнологии до 30 %. Эта цифра учитывает дополнительные затраты, связанные с изменением оснастки и кажущегося снижения производительности агрегатов газовой цементации.

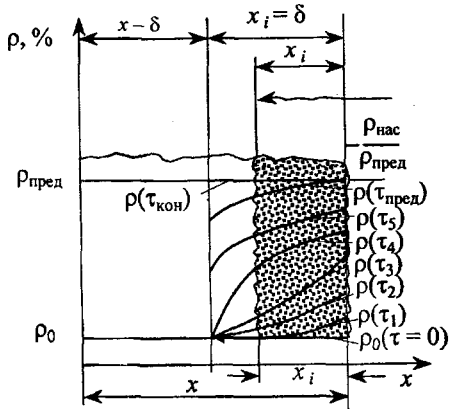


Рис. 3. Насыщение поверхностного слоя изделия размерами 120×80×40 мм при граничных условиях 3-го рода

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленные теплотехнологии: Печи и сушила машиностроительного производства: Учеб. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова и др.; Под общ. ред. А. П. Несенчука, В. И. Тимошпольского. – Мн.: Вышэйш. шк., 1999.
2. Моргунов Б. М. и др. Термодинамика железоуглеродистых сплавов. – М.: Металлургиздат, 1972.

Представлена кафедрой  
ПТЭ и Т

Поступила 20.05.2004