МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

The methods of calculation of maximal tension srtesses arising in slat at asymmetric heating are set out. The liminations on magnitude of heat flow and temperature of heating environment for initial period of heating and on regular stage of the process are formulated. The offered methods allow by means of variation of the heat-exchange coefficient value on the surface of slat to determine the thermal regime of heating excluding the possibility of exceeding of allowable level of thermal stresses in the heated article and arising of defects.

Н. П. ВОРОНОВА, Г. А. КЛИМОВИЧ, БНТУ

УДК 621:620.197.5

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ С УЧЕТОМ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрим теплотехнический процесс, описываемый системой:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u(l,\varphi)}{\partial \varphi} = \dfrac{\partial^2 u(l,\varphi)}{\partial l^2}, \\ \left.\dfrac{\partial u}{\partial l}\right|_{l=1} = \mathrm{Bi}[Q(\varphi) - u(1,\varphi)], \\ -\left.\dfrac{\partial u}{\partial l}\right|_{l=-1} = \mathrm{Bi}[Q(\varphi) - u(-1,\varphi)],\ u(l;0) = v, \\ -(1-\chi) \le Q(\varphi) \le 1+\chi, \end{cases} \qquad (1)$$

где $\varphi = \dfrac{at^2}{s^2}$ – безразмерное время; $l = \dfrac{x}{s}$ – безразмерная толщина ($-1 \le l \le 1$); $\mathrm{Bi} = \dfrac{\alpha s}{\lambda}$ – критерий Био; v – безразмерная начальная температура; χ – безразмерная температура (критерий несимметричности нагрева, $|\chi| < 1$); $u(l,\varphi)$ – температура; $Q(\varphi)$ – температура греющей среды.

Система (1) описывает процесс нагрева пластины толщиной $2S$, для которой a, λ, α – соответственно температуропроводность и теплопроводность материала пластины и коэффициент теплоотдачи.

Распределение температурных напряжений в пластине, согласно [1], приводит к максимальным растягивающим $\sigma_{\max}$ и сжимающим $\sigma_{\min}$ напряжениям:

$$\sigma_{\max\min} = \frac{\beta E}{1-\Theta} \frac{s}{3} \left.\frac{\partial u}{\partial x}\right|_{x=s} f(\mu),$$

где β – коэффициент линейного температурного расширения; E – модуль упругости; Θ – коэффициент Пуассона; $f(\mu)$ – функция от коэффициента несимметричности нагрева; $\mu = \dfrac{s+c}{2s}$ (c – константа, которая при нагреве постоянным тепловым потоком в регулярном режиме дает параболическое распределение температуры по толщине пластины);

$$u(x,t) = c(t) + c_1(x+c)^2,$$

где $c(t)$ – линейная функция времени; c_1 – константа.

Для пластины функция $f(\mu)$ определяется следующим образом [2]:

$$f(\mu) = \begin{cases} \left.\begin{matrix} 3(\mu-1)+\dfrac{1}{\mu},\ \mu<1, \\ 3-\dfrac{2}{\mu},\ \mu \ge 1, \end{matrix}\right\} \text{для } \sigma_{\max}, \\ \left.\begin{matrix} 3-\dfrac{2}{\mu},\ \mu<0{,}5, \\ \dfrac{1}{\mu-3},\ \mu \ge 0{,}5 \end{matrix}\right\} \text{для } \sigma_{\min}. \end{cases}$$

При нагреве наиболее опасны растягивающие напряжения, поэтому введем ограничение

$$\sigma_{\max} \le \sigma^*_{\max},$$

где $\sigma^*_{\max}$ – предельно допустимое растягивающее напряжение. На основании этого ограничения можно определить максимально допустимое значение теплового потока и в свою очередь по граничному условию задачи (1) – ограничение на температуру греющей среды

$$Q(t) = u(s,t) + \frac{c_m}{\alpha s f(\mu)}, \qquad (2)$$

где $c_m = \frac{3\lambda(1-\Theta)\sigma^*_{max}}{\beta E}$ — коэффициент, зависящий только от материала нагреваемого тела.

В регулярном режиме нагрева можно через внешний теплообмен судить о температурных напряжениях в пластине.

Практическое применение формулы (2) позволяет при ограничении на температуру греющей среды

$$Q(t) \le A = \text{const} \qquad (3)$$

в начальной стадии нагрева, когда растягивающие термонапряжения не достигли еще максимально допустимой величины, ограничиться только ими. Начиная с момента времени t_1, когда $\sigma_{max}(t_1) \le \sigma^*_{max}$, необходимо, кроме ограничения (3), учитывать и ограничение (2). Момент времени t_1 определяется из условия

$$u(s,t_1) = u_0 + \Delta u_{max},$$

где Δu_{max} — максимально допустимый перепад температур по толщине пластины с точки зрения допустимых термонапряжений. Величину Δu_{max} можно найти из формулы:

$$\sigma^*_{max} = \frac{\beta E}{1-\Theta}\frac{\Delta u_{max}}{3}\frac{f(\mu)}{\mu^2},$$

если

$$\min u(x,t) \ge \delta, \quad -s < x < s,$$

где δ — температура, при которой материал имеет достаточную пластичность для погашения термонапряжений; можно учитывать только ограничения (3).

Момент времени t_2, когда ограничение (3) теряет силу, может быть определен из выражения

$$u(s,t_2) = \delta + \Delta u_{max}.$$

Следовательно, для выполнения ограничений на внутренние термонапряжения σ_{max} при использовании соотношения (3) необходимо знать температуру поверхности пластины $u(s,t)$ из системы (1) [3].

Тогда определяются моменты времени t_1 и t_2, между которыми должно быть выполнено ограничение (3), использующее также текущее значение температуры поверхности $u(s,t)$, $t_1 \le t \le t_2$.

Литература

1. Гейтвуд Б.Е. Температурные напряжения. М.: Наука, 1969.

2. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1975.

3. Воронова Н.П., Михнова Р.В. Разработка оптимального по времени режима работы печи садочного типа // Изв. вузов. Энергетика. 1996. №5.