

**ТЕРМОДИАГНОСТИКА ПО НЕСТАЦИОНАРНЫМ ПОКАЗАНИЯМ ТЕРМОПАР, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ РАЗНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

©2018 Е.В. Суриков

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

**THERMODIAGNOSTICS ACCORDING TO THE UNSTEADY THERMOCOUPLE READINGS INSTALLED ON THIN-WALL ELEMENTS OF DIFFERENT SHAPES**

Surikov E.V. (FSUE CIAM, Moscow, Russian Federation)

*The temperature fields of construction that often include thin metallic covering and shells can undergo significant changes within short periods of time in the high-intensity heat transfer processes occurred in combustion chambers, heat-exchange units, under aerodynamic heat etc. The procedure for determining of the transient heat flux as well as the temperature of heat transfer surface according to the external thermocouples readings is specified for thin-walled shells of different shapes.*

В инженерной практике часто приходится рассматривать обратную задачу теплопроводности, когда по известным из эксперимента температурам оболочки определяют тепловые потоки и температуру поверхности теплообмена, непосредственное измерение которой затруднительно, а для ряда реальных конструкций, в том числе тонкостенных, не допустимо.

Деление тел на термически тонкие и массивные тела условно, т.к. в процессе нагрева тело строго тонким быть не может из-за перепада температур по его сечению. Принято относить тела к термически тонким, если критерий Био меньше 0.1...0.25.

Для тонкой плоской стенки при отсутствии продольного перетока тепла уравнения, для расчёта нестационарного теплового потока и температуры поверхности теплообмена по измерениям на наружной стороне, можно получить на основании баланса тепла для двух элементов пластины, выделенных путём разбиения стенки по толщине на две части, рис. 1.

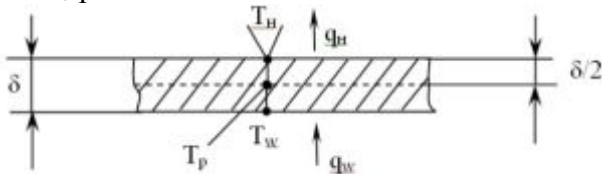


Рис. 1. Схема разбиения пластины на расчётные элементы

$$\Delta T_n C(T_n) \rho \frac{\delta}{2} = -\lambda(T_p) \frac{T_n - T_w}{\delta} \Delta \tau - q_n \Delta \tau, \quad (1)$$

$$\Delta T_w C(T_w) \rho \frac{\delta}{2} = -\lambda(T_p) \frac{T_w - T_n}{\delta} \Delta \tau - q_w \Delta \tau, \quad (2)$$

где  $T_p = \frac{T_n + T_w}{2}$ ;  $T$  – температура;  $C(T)$  –

теплоёмкость;  $\lambda(T)$  – теплопроводность;

$q$  – тепловой поток;  $\delta$  - толщина стенки;

$\rho$  – плотность материала;

$\tau$  – время.

Индексы относятся к поверхностям:

w – теплообмена; p – разбиения на эле-

менты; n – наружной поверхности.

Преобразование уравнения (1) даёт:

$$T_w = T_n + \frac{dT_n}{d\tau} \cdot \frac{C(T_n) \cdot \rho \cdot \delta^2}{2 \cdot \lambda(T_p)} + \frac{q_n \cdot \delta}{\lambda(T_p)}. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет получить температуру поверхности теплообмена методом приближений. Из уравнения (2) можно получить

$$q_w = \frac{dT_w}{d\tau} \cdot C(T_w) \cdot \rho \cdot \delta / 2 + \lambda(T_p) \cdot \frac{T_w - T_n}{\delta}. \quad (4)$$

Значения  $T_w$  и  $\lambda(T_p)$ , полученные в результате использования выражения (3), позволяют определять нестационарный тепловой поток на поверхности теплообмена при помощи (4).

Однако реальные тонкостенные конструкции не всегда можно представлять в виде пластины [4]. При наличии кривизны оболочки в выражениях (3) и (4) появляются дополнительные коэффициенты, характеризующие особенности геометрии, которые по-разному проявляются при установке измерительной термопары на выпуклой и вогнутой поверхностях.

В этом случае уравнения (3) и (4) можно использовать в виде:

$$T_w = T_{изм} + \frac{dT_{изм}}{d\tau} \cdot \frac{C(T_{изм}) \cdot \rho \cdot \delta^2}{2 \cdot \lambda(T_p)} \cdot \kappa_1 + \frac{q_{ум} \cdot \delta}{\lambda(T_p)} \cdot \kappa_2, \quad (5)$$

$$q_w = \frac{dT_w}{d\tau} \cdot C(T_w) \cdot \rho \cdot \frac{\delta}{2} \cdot k_3 + \lambda(T_p) \cdot \frac{T_w - T_{изм}}{\delta} \cdot k_4, \quad (6)$$

где  $T_{изм}$  – измеренное значение температуры;  $q_{ум}$  – утечки тепла с поверхности измерения;  $T_p = (T_w + T_{изм})/2$ ;  $d$  – диаметр расположе-

ния измерителя;  $\varphi$  – полуугол при вершине конуса.  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – геометрические коэффициенты для тонкостенных цилиндров, конусов и сфер при установке измерителя как на вогнутой ( $d=d_w+2\cdot\delta$ ), так и на выпуклой ( $d=d_w-2\cdot\delta$ ) части поверхности приведены в табл. 1;

Таблица 1 - Геометрические коэффициенты

Коэффициенты формы		Тип оболочки		
		Цилиндрическая	Коническая	Сферическая
Выпуклая поверхность измерения	$k_1$	$\frac{2 \cdot d - \delta}{2 \cdot (d - \delta)}$	$\frac{(2 \cdot d - \delta \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi}{2 \cdot (d - \delta \cdot \cos \varphi)}$	$\frac{3 \cdot d^2 - 3 \cdot d \cdot \delta + \delta^2}{3 \cdot (d - \delta)^2}$
	$k_2$	$\frac{d}{d - \delta}$	$\frac{d}{d - \delta \cdot \cos \varphi}$	$\left(\frac{d}{d - \delta}\right)^2$
	$k_3$	$\frac{2 \cdot d - 3 \cdot \delta}{2 \cdot (d - 2 \cdot \delta)}$	$\frac{(2 \cdot d - 3 \cdot \delta \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi}{2 \cdot (d - 2 \cdot \delta \cdot \cos \varphi)}$	$\frac{3 \cdot d^2 - 9 \cdot d \cdot \delta + 7 \cdot \delta^2}{3 \cdot (d - 2 \cdot \delta)^2}$
	$k_4$	$\frac{d - \delta}{d - 2 \cdot \delta}$	$\frac{d - \delta \cdot \cos \varphi}{d - 2 \cdot \delta \cdot \cos \varphi}$	$\left(\frac{d - \delta}{d - 2 \cdot \delta}\right)^2$
Вогнутая поверхность измерения	$k_1$	$\frac{2 \cdot d + \delta}{2 \cdot (d + \delta)}$	$\frac{(2 \cdot d + \delta \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi}{2 \cdot (d + \delta \cdot \cos \varphi)}$	$\frac{3 \cdot d^2 + 3 \cdot d \cdot \delta + \delta^2}{3 \cdot (d + \delta)^2}$
	$k_2$	$\frac{d}{d + \delta}$	$\frac{d}{d + \delta \cdot \cos \varphi}$	$\left(\frac{d}{d + \delta}\right)^2$
	$k_3$	$\frac{2 \cdot d + 3 \cdot \delta}{2 \cdot (d + 2 \cdot \delta)}$	$\frac{(2 \cdot d + 3 \cdot \delta \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi}{2 \cdot (d + 2 \cdot \delta \cdot \cos \varphi)}$	$\frac{3 \cdot d^2 + 9 \cdot d \cdot \delta + 7 \cdot \delta^2}{3 \cdot (d + 2 \cdot \delta)^2}$
	$k_4$	$\frac{d + \delta}{d + 2 \cdot \delta}$	$\frac{d + \delta \cdot \cos \varphi}{d + 2 \cdot \delta \cdot \cos \varphi}$	$\left(\frac{d + \delta}{d + 2 \cdot \delta}\right)^2$

Для определения границы тонких тел ограничение по критерию Био не достаточно. Иногда при одинаковой точности формулы (5) и (6) могут использоваться и при  $Bi > 0.25$ .

В этих случаях нужно внимательно анализировать допускаемую при расчётах погрешность, так как в конечном итоге только её величина определяет предпочтительность и представительность метода.