УДК 621.438:536.24

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ДЕТАЛЕЙ ГТД

В. А. ТРУШИН

Факультет авиационных двигателей УГАТУ
Тел: (3472) 23 08 44 E-mail: trush@ugatu.ac.ru

Рассмотрена методика расчета эффективных коэффициентов теплопроводности многослойных многокомпонентных теплозащитных покрытий с определением коэффициентов в каждом отдельном слое при решении стационарной сопряженной задачи теплопроводности для конкретной охлаждаемой стенки с покрытием. Проанализированы три расчетные модели для определения коэффициентов теплопроводности каждого слоя в зависимости от массового состава компонентов в нем. Установлено существенное отличие результатов расчетов по этим моделям и сделан вывод о необходимости экспериментального обоснования и подтверждения одной из этих трех моделей или их корректировки. Получена формула для теплового потока через температуры поверхностей рассматриваемого отдельного слоя при нелинейном распределении температур по толщине этого слоя

Охлаждаемая стенка; лопатка турбины; камера сгорания; теплозащитное покрытие; многослойное; массовые доли; металлокерамика; теплопроводность

ВВЕДЕНИЕ

С ростом температур рабочего газа T_f и коэффициентов теплоотдачи α на таких деталях, как лопатки турбин, стенки жаровых труб камер сгорания и стенки реактивных сопел, широко применяются теплозащитные покрытия из низкотеплопроводных материалов, как, например, двуокись циркония ZrO_2, окись иттрия Y_2O_3, двуокись церия CeO_2 и другие.

В целях уменьшения возможности отслоения теплозащитного покрытия от металлической поверхности, защищаемой от перегрева детали, его выполняют нанесением послойно с изменением процентного содержания металла и низкотеплопроводного материала с переходом от первого слоя на металле к последнему на газовой поверхности. Первый слой на металле может содержать около 95% того же металла и всего около 5% низкотеплопроводного материала. Второй слой состоит из 90% металла и 10% теплозащитного материала и т. д. Предпоследний слой содержит около 95% низкотеплопроводного материала и около 5% металла. Последний слой может не содержать металла. Общая толщина теплозащитного покрытия Δ обычно не превышает одного миллиметра [1]. Схема нанесенной на металлическую стенку структуры теплозащитного покрытия представлена на рис. 1.

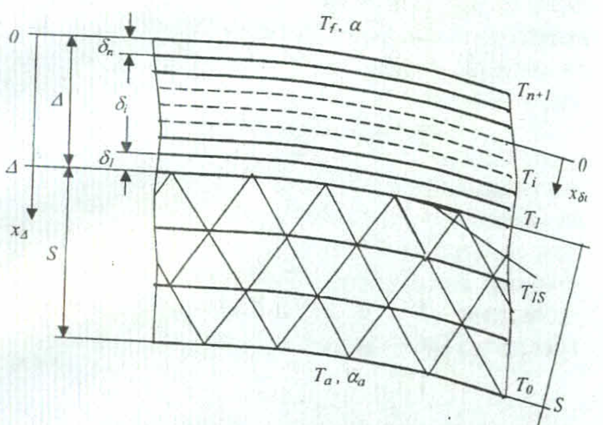


Рис. 1. Расчетная схема охлаждаемой стенки с многослойным многокомпонентным теплозащитным покрытием толщиной Δ

Толщина первого слоя (на поверхности детали, где $x_\Delta = \Delta$) равна δ_1 с температурами T_1 при $x_\Delta = \Delta$ и T_2 при $x_\Delta = \Delta - \delta_1$. Толщина i-го слоя (на расстоянии $x_{\Delta i}$ от поверхности покрытия) равна δ_i с температурами T_i при $x_\Delta = \Delta - \sum\limits_{k=1}^{i-1} \delta_k$ и T_{i+1} при $x_\Delta = \Delta - \sum\limits_{k=1}^{i} \delta_k$. Толщина последнего n-го слоя равна δ_n с температурами его границ T_n и T_{n+1}.

РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Зависимость коэффициента теплопроводности λ от температуры T обычно для конструкционных материалов представляется в виде:

для металла

$$\lambda_m = a_m + b_m T, \qquad (1)$$

для низкотеплопроводного компонента (неметалла)

$$\lambda_n = a_n + b_n T, \qquad (2)$$

где a_m, a_n, b_m, b_n — экспериментальные коэффициенты, приводимые в справочной литературе.

Если известны массовые доли компонентов в каждом напыляемом слое теплозащитного покрытия g_{mi} для металла и $g_{ni} = (1 - g_{mi})$ для неметалла, то коэффициент теплопроводности для конкретного i-го слоя определится как [1]

$$\begin{aligned} \lambda_i(T) &= g_{mi}\lambda_m(T) + g_{ni}\lambda_n(T) = \\ &= g_{mi}\left(a_m + b_m\bar{T}_i\right) + g_{ni}\left(a_n + b_n\bar{T}_i\right), \\ g_{mi}a_m &+ g_{ni}a_n + \left(g_{mi}b_m + g_{ni}b_n\right)\bar{T}_i = \\ &= A_i + B_i\bar{T}_i, \end{aligned} \qquad (3)$$

где

$$\begin{aligned} A_i &= g_{mi}a_m + g_{ni}a_n = \\ &= g_{mi}a_m + (1 - g_{mi})\,a_n, \end{aligned} \qquad (4)$$

$$\begin{aligned} B_i &= g_{mi}b_m + g_{ni}b_n = \\ &= g_{mi}b_m + (1 - g_{mi})\,b_n, \end{aligned} \qquad (5)$$

$\bar{T}_i$ – средняя температура i-го слоя. Аналогичны выражения для А и В, если компонентов окажется больше двух.

Формула (3) получается из предположения, что компоненты металла и неметалла в рассматриваемом слое распределены равномерно по толщине δ_i в виде вертикальных столбиков (рис. 2).

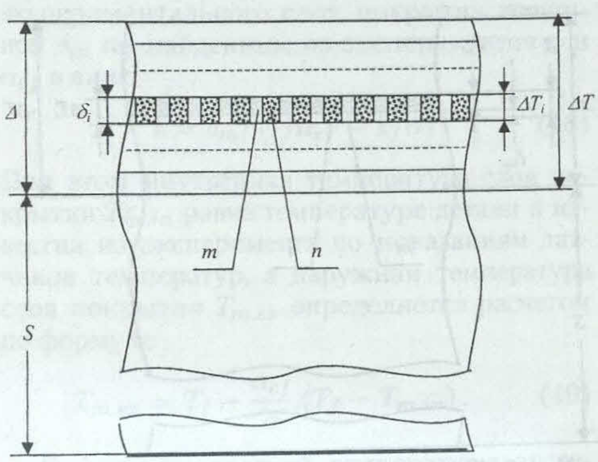


Рис. 2. Схема распределения компонентов металла (m) и неметалла (n) в слое i в виде столбиков

При этом предполагается, что каждый столбик проводит теплоту пропорционально его коэффициенту теплопроводности (λ_n или $\lambda_т$). Эта модель соответствует линейной зависимости коэффициента теплопроводности слоя от массовой доли металла g_{mi} в смеси. Формулу (3) можно привести к более удобному для практического применения виду, записав удельный тепловой поток через параметры i-го слоя в виде

$$\begin{aligned} q &= -\lambda_i\,(\Delta T)_i\,/\delta_i = \\ &= -\left[\lambda_m\,(\Delta T)_i\,\frac{g_{mi}}{\delta_i} + \lambda_n\,(\Delta T)_i\,\frac{(1 - g_{mi})}{\delta_i}\right] = \\ &= -\left[\lambda_m g_{mi} + \lambda_n\,(1 - g_{mi})\right](\Delta T)_i\,/\delta_i, \end{aligned} \qquad (6)$$

откуда

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \lambda_m g_{mi} + \lambda_n\,(1 - g_{mi}) = \\ &= \lambda_n\left[1 + (\lambda_m/\lambda_n - 1)\,g_{mi}\right]. \end{aligned} \qquad (7)$$

Значит, формула (3), с учетом () и (2а), сводится к виду

$$\lambda_i = \left(a_n + b_n\bar{T}_i\right)\left\{1 + \left[\frac{a_m + b_m\bar{T}_i}{a_n + b_n\bar{T}_i} - 1\right] g_{mi}\right\}. \qquad (8)$$

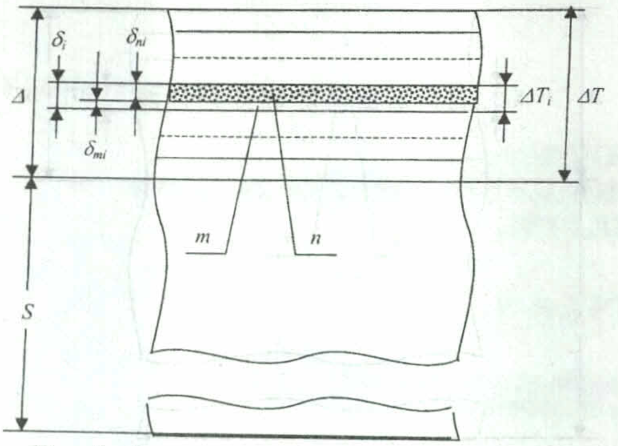


Рис. 3. Схема распределения компонентов металла (m) и неметалла (n) в слое i в виде пленок

Если рассматривать возможный вариант линейной зависимости теплового сопротивления $R_i = \delta_{mi}/\lambda_m + \delta_{ni}/\lambda_n$ слоя смеси от массовой доли металла g_{mi} в нем, то в этом случае целесообразно использовать выражение для разности температур в i-м слое через тепловой поток в виде

$$(\Delta T)_i = q\left(\delta_{mi}/\lambda_m + \delta_{ni}/\lambda_n\right) = q\delta_i/\lambda_i. \quad (9)$$

Общая разность температур в теплозащитном покрытии толщиной Δ определится через сумму тепловых сопротивлений отдельных слоев в виде

$$-(\Delta T) = -\sum_{i=1}^{n}(\Delta T)_i = = q\left(\sum_{i=1}^{n}\left(\delta_{mi}/\lambda_m + \delta_{ni}/\lambda_n\right)\right). \quad (10)$$

Так как в рассматриваемой модели $\delta_i = \delta_{ni} + \delta_{mi}$, то

$$1 = \delta_{mi}/\delta_i + \delta_{ni}/\delta_i = g_{mi} + (1 - g_{mi}). \quad (11)$$

Из формулы (7) следует

$$q = -(\Delta T)_i\,\lambda_i/\delta_i = = -\frac{(\Delta T)_i}{\delta_i}\left\{1/\left[\delta_{mi}/\left(\delta_i/\lambda_m\right) + \delta_{ni}/\left(\delta_i/\lambda_n\right)\right]\right\}, \quad (12)$$

откуда, с учетом (13), следует

$$\lambda_i = 1/\left[g_{mi}/\lambda_m + (1 - g_{mi})/\lambda_n\right] = = \lambda_n\left\{1/\left[1 - (1 - \lambda_n/\lambda_m)\,g_{mi}\right]\right\}. \quad (13)$$

Следовательно, для этой модели, с учетом () и (2а), можно записать

$$\lambda_i = \frac{a_n + b_n\bar{T}_i}{1 - \left(1 - \dfrac{a_n + b_n\bar{T}_i}{a_m + b_m\bar{T}_i}\right)g_{mi}}. \quad (14)$$

Формула (14) соответствует геометрической интерпретации по схеме, в которой компоненты металла и неметалла в слое распределены равномерно по толщине δ_i в виде горизонтальных зон (рис. 3).

Возможно рассмотрение третьей модели, по которой значение теплопроводности принимается как среднеарифметическое от значений по формулам (6) и (18)

$$\lambda_i = \frac{a_n + b_n\bar{T}_i}{2}\left\{\left[1 + \left(\frac{a_m + b_m\bar{T}_i}{a_n + b_n\bar{T}_i} - 1\right)g_{mi}\right] + \left[1 - \left(1 - \frac{a_n + b_n\bar{T}_i}{a_m + b_m\bar{T}_i}\right)g_{mi}\right]^{-1}\right\}. \quad (15)$$

Формулу (15) затруднительно интерпретировать какой-либо геометрической схемой.

Графическое изображение зависимости коэффициента λ от массовой доли металла в смеси покрытия g_m по уравнениям (6), (18) и (20) представлено на рис. 4 при $\bar{T}_i = 1000°$ С. При этом $\lambda_m = 8{,}41 + 0{,}0186T$ °C ($a_m = 8{,}41$ Wt/mK; $b_m = 0{,}0186$ Wt/mK^2) и $\lambda_n = 0{,}8 + 0{,}001T$ °C ($a_n = 0{,}8$ Wt/mK; $b_n = 0{,}001$ Wt/mK^2). Уравнению (8) соответствует линия 1, уравнению (14) — линия 3, уравнению (15) — линия 2.

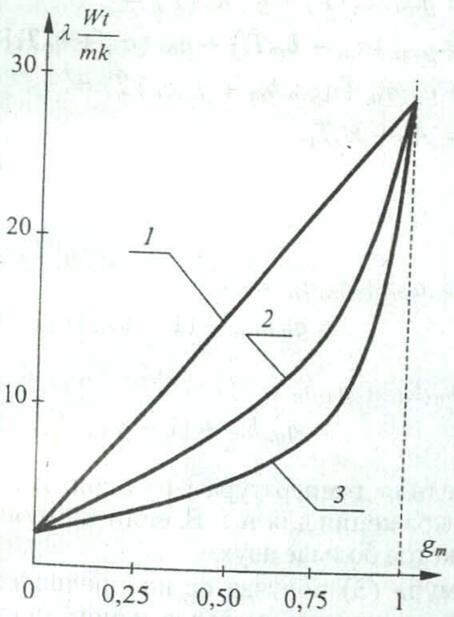


Рис. 4. График зависимости коэффициента теплопроводности λ двухкомпонентного теплозащитного покрытия от массовой доли металла g_m в смеси

На основании большого различия в кривых на рис. 4 следует сделать вывод о необходимости экспериментального определения зависимости коэффициента λ от массовой доли металла в смеси покрытия g_m. Эти эксперименты необходимо проводить при разных температурах смесей. Исследования по определению λ в слое смеси, выполненном по натурной технологии толщиной δ_m на детали из натурного материала, целесообразно проводить методом измерения коэффициентов теплоотдачи α. На стенке частично без покрытия и частично с покрытием измеряются соответственно α и α_{ef} [2] (рис. 5).

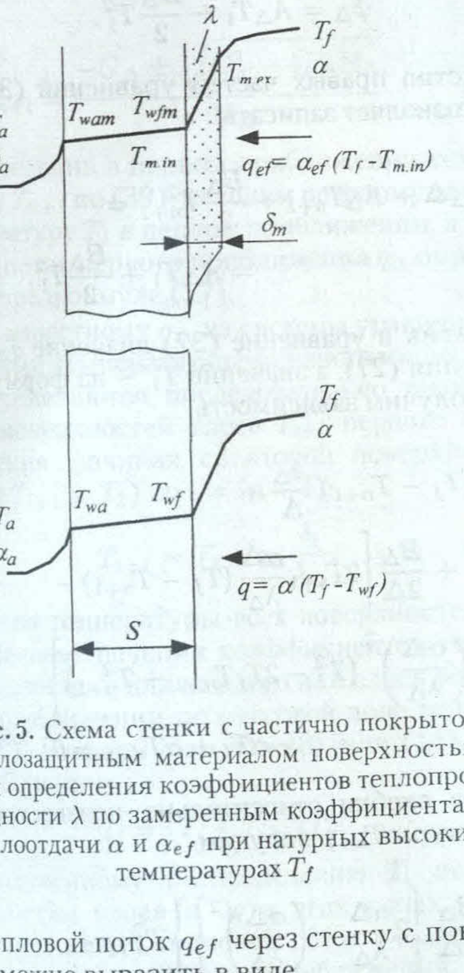


Рис. 5. Схема стенки с частично покрытой теплозащитным материалом поверхностью для определения коэффициентов теплопроводности λ по замеренным коэффициентам теплоотдачи α и α_{ef} при натурных высоких температурах T_f

Тепловой поток q_{ef} через стенку с покрытием можно выразить в виде

$$q_{ef} = \alpha (T_f - T_{m.ex}) = \frac{\lambda}{\delta_m} (T_{m.ex} - T_{m.in}) \qquad (16)$$

С другой стороны,

$$q_{ef} = \alpha_{ef} (T_f - T_{m.in}) . \qquad (17)$$

Из уравнений (16) и (17) следует формула для расчета коэффициента теплопроводности экспериментального слоя покрытия толщиной δ_m по найденным из экспериментов α и α_{ef} в виде

$$\lambda = \delta_m / (1/\alpha_{ef} - 1/\alpha) . \qquad (18)$$

При этом внутренняя температура слоя покрытия $T_{m.in}$ равна температуре детали и известна из эксперимента по показаниям датчиков температур, а наружная температура слоя покрытия $T_{m.ex}$ определяется расчетом по формуле

$$T_{m.ex} = T_f - \frac{\alpha_{ef}}{\alpha} (T_f - T_{m.in}) . \qquad (19)$$

В качестве средней температуры экспериментального слоя покрытия толщиной δ_m можно принять среднеарифметическую от температур $T_{m.in}$ и $T_{m.ex}$, так как эта толщина очень мала:

$$\bar{T} = (T_{m.in} + T_{m.ex}) /2 . \qquad (20)$$

Таким образом, получив в экспериментах для различных долей металла в смеси покрытия g_m значения λ по уравнению (18) и $\bar{T}$ по уравнению (20), можно проверить достоверность каждого из уравнений (8), (14), (15) или уточнить одно из них, наиболее близкое к экспериментальным данным.

Если рассматривать теплозащитное покрытие как многослойную структуру, то в пределах одного i-го тонкого слоя дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье имеет вид (см. рис. 1)

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda_i (T) \frac{dT}{dx} \right] = 0. \qquad (21)$$

Линеаризация этого уравнения осуществляется введением функции (подстановка Кирхгофа)

$$\varphi_i = \int_0^T \lambda_i (T) \, dT. \qquad (22)$$

Из совместного рассмотрения (21) и (22) получается уже ранее известное выражение для плотности теплового потока через искомое в зависимости от температуры поверхностей i-го слоя

$$q = \left[a_i + b_i \left(\frac{T_{i+1} + T_i}{2} \right) \right] \frac{T_{i+1} - T_i}{\delta_i} . \qquad (23)$$

Температуры отдельных слоев теплозащитного покрытия и их коэффициенты теплопроводности взаимозависимы и неизвестны. Поэтому целесообразно для решения задачи применить метод последовательных приближений. В первом приближении допустимо принять в качестве средней температуры $\bar{T}$ общего слоя ТЗП температуру поверхности элемента детали $T_{1.s}$, на которой этот слой нанесен (на рис. 1 этот элемент отмечен мелкой штриховкой) из расчета температурного состояния детали в первом приближении без учета наличия теплозащитного покрытия

$$\bar{T} = T_{1.s}\,. \qquad (24)$$

Расчет $T_{1.s}$ осуществляется предварительно одним из известных методов, например, элементарных балансов, если деталь сложной геометрии, или аналитически, если деталь классической конфигурации по действительному коэффициенту теплоотдачи со стороны газа α и температуре газа T_f и по параметрам со стороны охладителя. Тогда осредненное значение коэффициента теплопроводности λ_Δ в общем слое Δ определится по массовой доле металла $g_{m\Delta}$ в нем как (формула (8))

$$\lambda_\Delta = (a_n + b_n\bar{T}) \times \times \left\{1 + \left[\frac{(a_m + b_m\bar{T})}{(a_n + b_n\bar{T})} - 1\right] g_{m\Delta}\right\}. \qquad (25)$$

Возможен расчет λ_Δ по формуле (14) или по формуле (15).

Выражая плотность теплового потока q_Δ через разности неизвестных температур в каждом слое и на поверхности со стороны газа с приближенным постоянным значением λ_Δ, получаем уравнение с двумя неизвестными q_Δ и T_1 в форме

$$q_\Delta = \frac{T_f - T_1}{\sum\limits_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_\Delta} + \frac{1}{\alpha}}. \qquad (26)$$

С другой стороны, из равенства тепловых потоков от газа к покрытию и через него имеем

$$q_\Delta = \alpha\,(T_f - T_{n+1}) = \frac{\lambda_\Delta}{\Delta}\,(T_{n+1} - T_1)\,, \qquad (27)$$

откуда выражаем T_1 через T_{n+1} в виде

$$T_1 = T_{n+1} - \frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\,(T_f - T_{n+1})\,. \qquad (28)$$

Для определения температурного поля по общей толщине покрытия Δ на основании q_Δ находим A_Δ по (4) и B_Δ по (5) и обращаемся к интегралу уравнения (22), записав его, с учетом (25), в виде ($x = 0$)

$$\bar{\varphi}_0 = A_\Delta T_{n+1} + \frac{B_\Delta}{2} T_{n+1}^2, \qquad (29)$$

а из уравнения (22) для $x = \Delta$ будем иметь

$$\bar{\varphi}_\Delta = -q_\Delta\Delta + A_\Delta T_{n+1} + \frac{B_\Delta}{2} T_{n+1}^2. \qquad (30)$$

Но, с другой стороны, при $x = \Delta$ имеем температуру T_1, и по интегралу уравнения (22) можно записать

$$\bar{\varphi}_\Delta = A_\Delta T_1 + \frac{B_\Delta}{2} T_1^2. \qquad (31)$$

Равенство правых частей уравнений (30) и (31) позволяет записать

$$-q_\Delta\Delta + A_\Delta T_{n+1} + \frac{B_\Delta}{2} T_{n+1}^2 = = A_\Delta T_1 + \frac{B_\Delta}{2} T_1^2. \qquad (32)$$

Подставив в уравнение (32) значение q_Δ из уравнения (27), а значение T_1 — из формулы (22), получим зависимость

$$\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\,(T_f - T_{n+1})\,\frac{A_\Delta}{\Delta} + + \frac{B_\Delta}{2\Delta}\left[2T_{n+1}\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\,(T_f - T_{n+1}) - - \left(\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\right)^2 \left(T_f^2 - 2T_f T_{n+1} + T_{n+1}^2\right)\right] - - \alpha T_f + \alpha T_{n+1} = 0. \qquad (33)$$

Раскрыв скобки относительно неизвестной температуры T_{n+1}, получим

$$-\left\{\frac{B_\Delta}{2\Delta}\left[2\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta} + \left(\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\right)^2\right]\right\} T_{n+1}^2 + + \left[\frac{B_\Delta T_f \alpha}{\lambda_\Delta}\left(1 + \frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\right) + \alpha\left(1 - \frac{A_\Delta}{\lambda_\Delta}\right)\right] T_{n+1} - - \left[\alpha T_f - \frac{A_\Delta T_f \alpha}{\lambda_\Delta} + \frac{B_\Delta}{2\Delta}\left(\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\right)^2 T_f^2\right] = 0. \qquad (34)$$

Уравнение (34) имеет вид

$$F_\Delta T_{n+1}^2 + G_\Delta T_{n+1} + H_\Delta = 0, \qquad (35)$$

где

$$F_\Delta = -\left\{\frac{B_\Delta}{2\Delta}\left[2\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta} + \left(\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\right)^2\right]\right\}; \quad (36)$$

$$G_\Delta = \frac{B_\Delta T_f \alpha}{\lambda_\Delta}\left(1 + \frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\right) + \alpha\left(1 - \frac{A_\Delta}{\lambda_\Delta}\right); \quad (37)$$

$$H_\Delta = -\left[\alpha T_f - \frac{A_\Delta T_f \alpha}{\lambda_\Delta} + \frac{B_\Delta}{2\Delta}\left(\frac{\alpha\Delta}{\lambda_\Delta}\right)^2 T_f^2\right]. \quad (38)$$

Решением уравнения (35) является выражение

$$T_{n+1} = \frac{-G_\Delta \pm \sqrt{G_\Delta^2 - 4F_\Delta H_\Delta}}{2F_\Delta}. \quad (39)$$

Определив в первом приближении температуру T_{n+1} по (39), находим по формуле (28) температуру T_1 в первом приближении, а тепловой поток первого приближения q_Δ определяется по формуле (27).

По известному q_Δ из системы уравнений с частными температурными напорами по слоям определяются последовательно температуры поверхностей слоев T_{i+1} первого приближения, начиная со второй поверхности ($i = 1; T_{i+1} = T_2$) до $i = (n-1)$:

$$T_{i+1} = T_i + q_\Delta \frac{\delta_i}{\lambda_\Delta}. \quad (40)$$

Получив температуры всех поверхностей T_i, определяем значения коэффициентов теплопроводности λ_i для каждого из n слоев во втором приближении по массовой доле металла g_{mi} и $\bar{T}_i$ по формулам или (8), или (14), или (15). При этом

$$\bar{T}_i = (T_i + T_{i+1})/2. \quad (41)$$

Полученному распределению T_i по поверхностям слоев и λ_i в этих слоях соответствует новый тепловой поток q_N, отличающийся от q_Δ, первого приближения. При этом температура нижней поверхности первого слоя T_1 будет отличаться от температуры поверхности элемента детали $T_{1,s}$, рассчитанной в первом приближении без учета наличия теплозащитного покрытия. Для проведения расчетов во втором приближении для получения q_N по формуле типа (26) следует температуру T_1 скорректировать, приняв ее равной по выражению

$$T_{1\cdot N} = \frac{T_1 + T_{1.s}}{2} \quad (42)$$

и рассчитать q_N по формуле, аналогичной (26), с заменой T_1 на T_{1N}, и λ_Δ на λ_i, в виде

$$q_N = \frac{T_f - T_{1\cdot N}}{\sum\limits_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha}}. \quad (43)$$

По новому тепловому потоку q_N последовательно определяются новые температуры поверхности $(T_{i+1})_N$, по скорректированной температуре нижней поверхности и первого слоя, начиная от второй поверхности ($i = 1$, $T_{i+1} = T_{2N}$) до $i = n$, по формуле, аналогичной (40)

$$(T_{i+1})_N = (T_i)_N + q_n \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (44)$$

Затем уточняются значения коэффициентов теплопроводности λ_{iN} для каждого из n слоев, аналогично предыдущему приближению по $\bar{T}_{iN}$.

Для получения коэффициента осредненной теплопроводности $\lambda_{\Delta m}$ всего наслоения теплозащитного покрытия запишем выражение для теплового потока аналогично (43) через это $\lambda_{\Delta m}$ в виде

$$q_N = \frac{(T_1 - T_{n+1})_N}{\sum\limits_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_{iN}}} = \lambda_{\Delta m}\frac{(T_1 - T_{n+1})_N}{\Delta}, \quad (45)$$

откуда

$$\lambda_{\Delta m} = \Delta \Big/ \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_{i\cdot N}}. \quad (46)$$

Для проведения расчетов температур в детали с учетом наличия теплозащитного покрытия осуществляют корректировку коэффициента теплоотдачи α на эффективное его значение α_{ef} по формуле [2]

$$\alpha_{ef} = 1\Big/\left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\Delta}{\lambda_{\Delta m}}\right). \quad (47)$$

Получив температурное поле в детали и температуру поверхности рассматриваемого элемента $T_{1.sN}$ во втором приближении, сопоставляют его с принятой температурой $T_{1.N}$, найденной по формуле (42). Если отличие существенное, то температуру T_1 вновь корректируют по формуле

$$T_{1.NN} = T_{1.N} + (T_{1.N} - T_{1.sN})\,, \qquad (48)$$

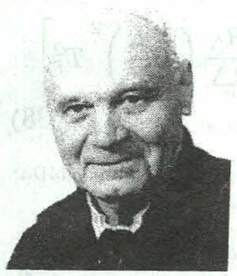
и далее цикл расчетов температур покрытия по формулам (42)–(48) и температур детали по $\alpha_{\text{эф}}$ повторяется до получения совпадения принятой температуры T_1 с расчетной $T_{1.s}$ на поверхности элемента детали с заданной точностью.

По представленным алгоритмам составлено программное обеспечение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

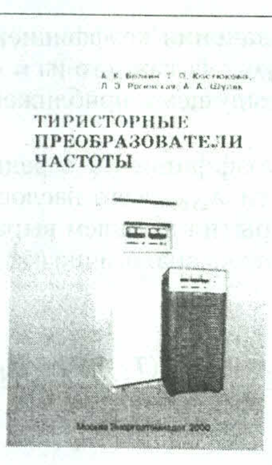
1. **Cavanagh J. R., Cross K. R., Newman R. L.** The graded thermal barrier — a new approach for turbine engine cooling // AIAA Paper. 1972. No 361. P. 88–92.
2. **Пат. 1804617 (РФ).** Способ определения теплофизических характеристик теплозащитного покрытия на материале / В. А. Трушин, В. Н. Федоров // Б. И. 1993. № 11.

ОБ АВТОРЕ



Трушин Владимир Алексеевич, профессор каф. теории авиационных и ракетных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1960), д-р техн. наук по двигателям ЛА и их технологии (защ. в КАИ, 1985). Исследования в области системы охлаждения лопаток и дисков авиационных турбин.

Информация



А. К. Белкин, Т. П. Костюкова, Л. Э. Рогинская, А. А. Шуляк

Тиристорные преобразователи частоты

М.: Энергоатомиздат, 2000

263 с. Библиогр.: 56 назв.

Производственно-практическое издание

ISBN 5-283-00762-2

В книге рассматриваются силовые схемы тиристорных преобразователей частоты, которые нашли широкое применение при конструировании, изготовлении и эксплуатации в промышленности. Сделан акцент на вопросы анализа электромагнитных процессов в таких схемах и расчета параметров индуктивных элементов. Описаны тиристорные преобразователи частоты для различных индукционных технологий. Для инженеров, техников, студентов и научных работников, специализирующихся в области промышленной электроники, преобразовательной техники, энергетики и электротехнологии.