

УДК 621.438:536.24

Д.Ф. Симбирский, А.Г. Добровольский*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТЕНКАХ КОНВЕКТИВНО ОХЛАЖДАЕМЫХ ВЫСОКОНАГРЕТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Предложен общий подход к определению относительной температурной эффективности теплозащитных покрытий (ТЗП), которые наносятся на стенки высоконагретых, охлаждаемых различными способами деталей. Для конвективной схемы охлаждения плоских стенок с одно- и многослойными ТЗП получены замкнутые решения в критериальной форме для приближенного определения показателей температурной эффективности ТЗП на стенках произвольной формы, а также для выполнения оптимизационных расчетов и выводов при проектировании ТЗП в составе конкретных теплоэнергетических машин и устройств.

Конвективное охлаждение, стенка детали, теплозащитное покрытие (ТЗП), температурная эффективность ТЗП

Введение

В форсированных по температуре рабочих сред тепловых машинах, в частности, в стационарных газотурбинных установках (ГТУ) и авиационных газотурбинных двигателях (ГТД), в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), в промышленных горелках для сжигания углеводородных топлив и в ряде других применяются системы охлаждения высоконагретых деталей различного типа (конвективные, конвективно-пленочные, с проникающей стенкой и другие). При этом в ряде случаев на поверхности деталей в области их контакта с агрессивными высокотемпературными рабочими средами, наносятся многофункциональные защитные покрытия, в том числе и термобарьерные или теплозащитные (ТЗП).

1. Постановка задач исследования

1.1 В последнее десятилетие *существенное развитие и применение на практике получили ТЗП для рабочих и сопловых лопаток турбин, а также отдельных поверхностей камер сгорания авиационных ГТД и стационарных ГТУ [1-2]. Подобные ТЗП являются многослойными покрытиями, обычно включающими, по крайней мере, два слоя: металлический жаростойкий антикоррозионный подслои, чаще всего на основе многокомпонентных систем NiCrAlY или NiCoCrAlY толщиной 0,06-0,08 мм, и керамический термобарьерный слой на основе окиси циркония ZrO₂ толщиной 0,05-0,25 мм.*

Задачами ТЗП являются повышение работоспособности детали путем снижения ее температур, уменьшения темпов ее нагрева-охлаждения

на переменных режимах работы, а также повышения сопротивления высокотемпературному окислению как за счет снижения температуры поверхности, так и путем уменьшения доступа к ней кислорода и продуктов сгорания топлив. Кроме того, снижение рабочих температур ответственных деталей предоставляет возможность для повышения температуры рабочего тела на входе в турбину, что может дать ощутимый технико-экономический эффект в виде повышения тяги (мощности) или снижения удельного расхода топлива.

1.2 *Разработка подобных ТЗП является сложной научно-технической проблемой, заключающейся в комплексном решении задач технологии нанесения покрытий, а также задач обеспечения прочностной надежности как самих ТЗП, так и защищаемых деталей. При этом первоочередной проблемой является многокритериальное оптимальное (рациональное) проектирование разрабатываемого ТЗП в системе конкретных ГТУ или ГТД, все основные составляющие целевой функции которого зависят от уровня снижения температуры защищаемой поверхности.*

В дальнейшем будем в качестве показателя этого уровня использовать величину δt относительной температурной эффективности ТЗП

$$\delta t = \frac{\Delta t}{T_c - T_{окс}}, \quad (1)$$

где Δt - разница температур нагреваемой поверхности стенки детали при отсутствии (t_c) и наличии ($t_{c+П}$) ТЗП соответственно;

T_2 и $T_{\text{охл}}$ - температуры нагревающей (газ) и охлаждающей сред соответственно.

Для оценок эффективности охлаждения стенки также принято использовать такие показатели как глубины охлаждения θ_c и $\theta_{c+\Pi}$ соответственно при отсутствии и наличии на стенке ТЗП, которые определяются по следующим формулам:

$$\theta_c = \frac{T_2 - t_c}{T_2 - T_{\text{охл}}}; \quad (2)$$

$$\theta_{c+\Pi} = \frac{T_2 - t_{c+\Pi}}{T_2 - T_{\text{охл}}}. \quad (3)$$

В общем случае, для любого типа системы охлаждения и любого произвольного профиля охлаждаемой стенки будем считать справедливым по определению следующее очевидное соотношение:

$$t_{c+\Pi} = t_c - \Delta t. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3) с учетом (2), получим следующую универсальную зависимость для определения относительной температурной эффективности ТЗП:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{T_2 - T_{\text{охл}}} = \theta_{c+\Pi} - \theta_c. \quad (5)$$

Так как тип системы охлаждения стенки вносит свои существенные отличия в процедуру определения δt по формуле (5), то в дальнейшем остановимся на более детальном рассмотрении наиболее простой *конвективной системы охлаждения стенки*.

1.3. *Имеется несколько путей реализации зависимости (5) для определения δt , а именно:*

1) построение температурных полей охлаждаемых деталей без и с ТЗП, например, с помощью МКЭ и дальнейший прямой расчет в локальных областях охлаждаемой стенки профиля детали по формуле (5);

2) получение приближенных оценок δt путем выделения на произвольной охлаждаемой стенке участков простейших форм, для которых предварительно получены удобные зависимости для δt .

Нами в настоящей работе *выбран второй путь*, причем в качестве простейших фрагментов, аппроксимирующих реальный профиль стенки, предполагается использовать приведенную на рис. 1. *бесконечную плоскую стенку* с нанесенными на нее однослойными или многослойными ТЗП, а также без ТЗП. Предполагается, что режим теплопереноса в стенке – установившийся при

$\lambda_i = const$ и что контактные температурные сопротивления между слоями стенки и ТЗП пренебрежимо малы.

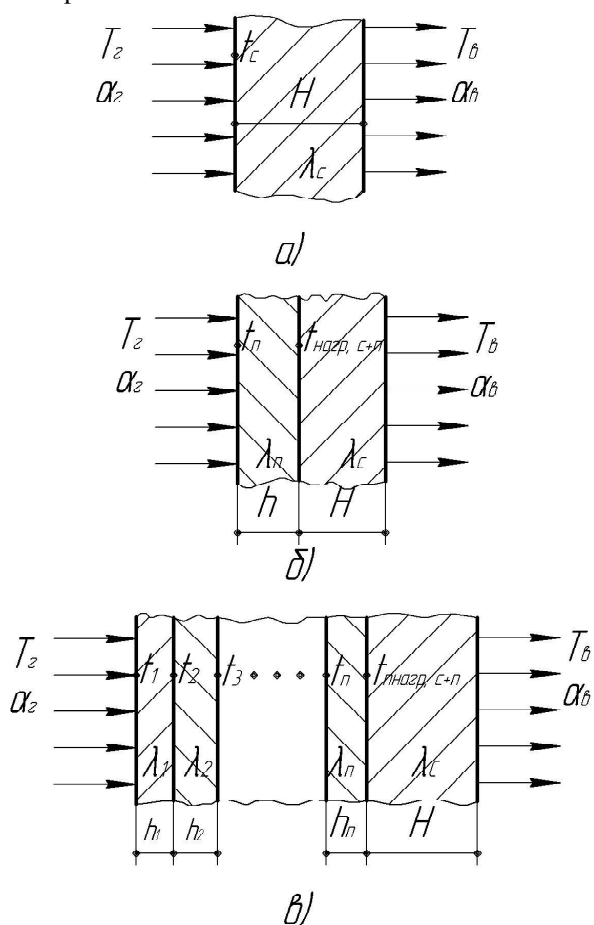


Рис. 1. Расчетные схемы теплопереноса в конвективно нагреваемой и охлаждаемой бесконечной плоской стенке. а) – стенка без ТЗП; б) и в) – стенки с одно- и многослойными ТЗП

При этом основное внимание будет уделено варианту плоской стенки с однослойным ТЗП.

Для приведенных на рис. 1. конвективно нагреваемых и охлаждаемых бесконечных плоских стенок и условий установившегося линейного теплопереноса воспользуемся общеизвестным решением задачи [3]. На его основе для однослойного ТЗП можно записать следующие исходные зависимости:

$$t_c = T_2 - \frac{1}{\alpha_2} (T_2 - T_b) \left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{H}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_b}} \right), \quad (6)$$

$$t_{c+\Pi} = T_2 - \frac{1}{\alpha_2} (T_2 - T_b) \left(\frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{h}{\lambda_{\Pi}} + \frac{H}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_b}} \right). \quad (7)$$

где α_z и α_6 - коэффициенты конвективной теплоотдачи на нагреваемой и охлаждаемой поверхностях.

Таким образом, с помощью формул (6) и (7) можно получить численные значения показателей (1) и (3) температурной эффективности ТЗП. Однако численный характер решения, в частности, относительно δt , недостаточно пригоден для упомянутых в разделе 1.2. задач оптимального (рационального) проектирования ТЗП в системах конкретных ГТД и ГТУ. В связи с этим нами была поставлена следующая задача исследования: получение зависимостей [2], [3] и [5] в замкнутой критериальной форме, удобной для оптимизационных расчетов и выводов.

2. Температурная эффективность однослойных ТЗП на плоской стенке

2.1. Подставив выражения (6) и (7) в формулы (2) и (3), а полученные из них значения глубин охлаждения θ_c и $\theta_{c+л}$ - в универсальную формулу (5) и проведя соответствующие преобразования, получим решение задачи в следующей замкнутой форме в функции критериев

подобия и безразмерного комплекса $\bar{\alpha} = \frac{\alpha_z}{\alpha_6}$ как одной из основных характеристик конвективной системы охлаждения стенки:

$$\theta_c = \frac{1}{1 + \bar{\alpha} + Bi_c}; \quad (8)$$

$$\theta_{c+л} = \frac{1 + Bi_{л}}{(1 + \bar{\alpha}) + Bi_c + Bi_{л}}; \quad (9)$$

$$\delta t = \frac{\Delta t}{T_z - T_6} = \frac{Bi_{л}(\bar{\alpha} + Bi_c)}{(1 + \bar{\alpha} + Bi_c)(1 + \bar{\alpha} + Bi_c + Bi_{л})}, \quad (10)$$

где $Bi_c = \frac{\alpha_z H}{\lambda_c}$ и $Bi_{л} = \frac{\alpha_z h}{\lambda_{л}}$ - критерии Био для стенки и для слоя ТЗП соответственно.

2.2. Проведем анализ полученного решения (10), вначале в асимптотической (предельной) форме.

2.2.1. При $Bi_{л} \rightarrow \infty$ (максимальные значения α_z и h , минимальное - $\lambda_{л}$) раскрываем неопределенность типа 0 на 0 в формуле (10) и получим

$$\lim_{Bi_{л} \rightarrow \infty} \delta t = 1 - \frac{1}{1 + \bar{\alpha} + Bi_c}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что при $Bi_{л} \rightarrow \infty$ предельные значения δt зависят от величин Bi_c и $\bar{\alpha}$, как это показано на рисунке 2.

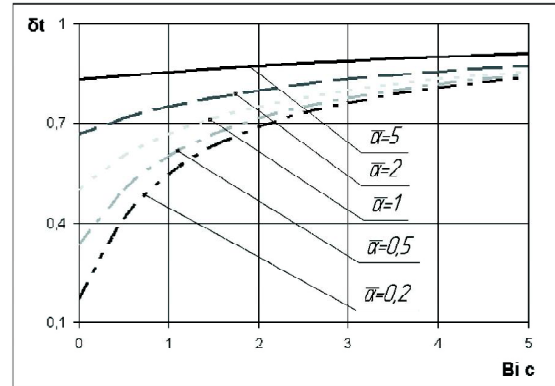


Рис. 2. Значения δt при $Bi_{л} \rightarrow \infty$ и различных Bi_c и $\bar{\alpha}$

2.2.2. При $Bi_c \rightarrow \infty$ (максимальные значения α и H , минимальное - λ_c) аналогичным образом получим

$$\lim_{Bi_c \rightarrow \infty} \delta t = \frac{Bi_{л}}{2Bi_c + 2(1 + \bar{\alpha}) + Bi_{л}} = 0. \quad (12)$$

Из (12) следует, что при ТЗП становится температурно-неэффективным.

2.2.3. Было проведено исследование наличия экстремального значения $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{сп}$, максимальное значение δt . Была найдена следующая зависимость $\bar{\alpha}_{сп}$ от Bi_c и $Bi_{л}$:

$$\bar{\alpha}_{сп} = \sqrt{Bi_{л} + 1} - Bi_c, \quad (13)$$

2.2.4. Также был проведен анализ влияния Bi_c и безразмерного комплекса $\bar{\alpha}$ на глубину исходного (без ТЗП) охлаждения θ_c стенки (рис. 3)

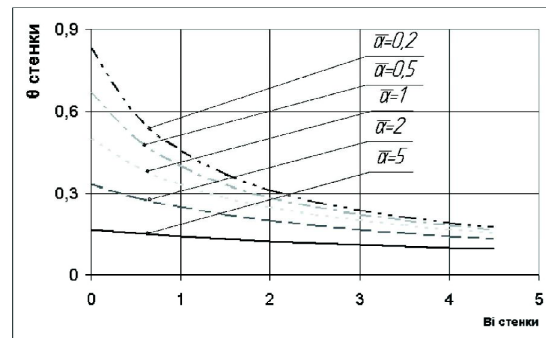


Рис. 3. Зависимость глубины исходного (без ТЗП) охлаждения θ_c от Bi_c и $\bar{\alpha}$

При анализе данных рис. 3. необходимо учитывать, что входящее в критерий Bi_c отношение $\frac{H}{\lambda_c}$ при практической реализации изменяется незначительно ($H = 0,5 \div 3$ мм; $\lambda_c = 10 \div 20 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$). В то же время α_z для охлаждаемых деталей различных

тепловых машин, например, стенок сопел ЖРД, лопаток турбин ГТУ или ГТД и промышленных горелок может изменяться на 5 – 10 порядков.

Иными словами, величина α_2 во многом определяет принадлежность охлаждаемой стенки к тому или иному устройству. Поэтому для последующей иллюстрации конкретных случаев применения ТЗП нами выбраны следующие значения Bi_c : $Bi_c = 1$ (охлаждаемые лопатки турбин ГТД или ГТУ) и $Bi_c = 1 \cdot 10^{-2}$ (охлаждаемые промышленные горелки).

2.3. Результаты расчетов величины δt по формуле (12) приведены на рис. 4 и 5 для случаев $\alpha_2 = 1 \cdot 10^4$ и $\alpha_2 = 1 \cdot 10^2$ соответственно. Для оценки абсолютного значения Δt снижаемой ТЗП температуры стенки можно положить, что разница $T_2 - T_6$ может достигать величин до 1000 °С.

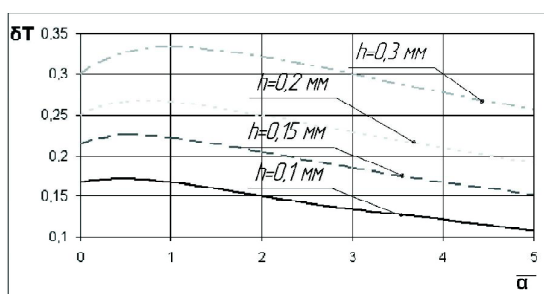


Рис. 4. Зависимость δT от $\bar{\alpha}$ и толщины ТЗП h для

случая $\alpha_2 = 1 \cdot 10^4 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$ (ГТД или ГТУ), $Bi_c = 1$,

$$\lambda_{II} = 1 \frac{Bm}{m \cdot K}$$

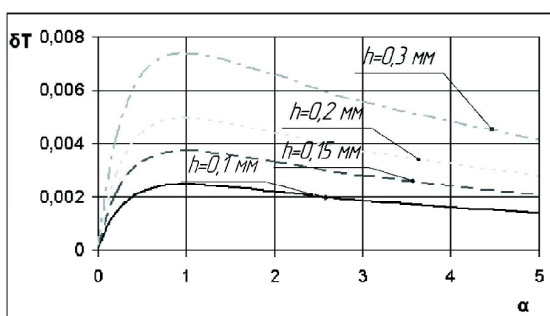


Рис. 5. Зависимость δT от $\bar{\alpha}$ и толщины ТЗП h для

случая $\alpha_2 = 1 \cdot 10^2 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$ (промышленная горелка),

$$Bi_c = 1 \cdot 10^{-2}, \lambda_{II} = 1 \frac{Bm}{m \cdot K}$$

Анализ данных рис. 4 (случай ГТУ и ГТД) показывает, что величина Δt снижаемой ТЗП температуры стенки при значениях его толщины h в пределах до 0,2 – 0,3 мм может достигать 150 – 300 °С. В этом случае основная проблема заключается в повышении интенсивности теплообмена охлаждаемого воздуха на внутренней поверхностью стенки, выражаемой величиной α_2 с целью достижения параметра $\bar{\alpha}$ системы охлаждения значений порядка 3-4.

3. Температурная эффективность многослойного ТЗП на конвективно охлаждаемой бесконечной плоской стенке

Рассмотрим случай, когда нанесение на плоскую стенку ТЗП состоит из $(n-1)$ многофункциональных слоев, отличающихся своими толщинами h_i , коэффициентами теплопроводности λ_i и температурами нагреваемых поверхностей слоев t_i , где $i = 1, 2, 3, n-1$ (рис. 1в). Для этого случая путем внесения соответствующих изменений в известное решение (7) для температуры \bar{t}_{c+II} поверхности стенки можно получить для показателей температурной эффективности следующие аналоги формул (9) и (10):

$$\bar{\theta}_{c+II} = \frac{1 + \bar{Bi}_{II}}{(1 + \bar{\alpha}) + Bi_c + Bi_{II}}; \quad (14)$$

$$\bar{\delta t} = \frac{\bar{Bi}_{II}(\bar{\alpha} + Bi_c)}{(1 + \bar{\alpha} + Bi_c)(1 + \bar{\alpha} + Bi_c + Bi_{II})}, \quad (15)$$

где $\bar{Bi}_{II} = \alpha_2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i}{\lambda_{IIi}}$ – критерий подобия Био

для $(n-1)$ -слойного ТЗП.

Заключение

В настоящей работе для оценки температурной эффективности ТЗП, нанесенных на стенки охлаждаемых деталей, помимо использования общепринятого понятия глубины охлаждения θ_{c+II} стенки с ТЗП, введено понятие относительной δt температурной эффективности ТЗП. Показано, что в общем случае для любого типа системы охлаждения и стенки произвольного профиля значение δt определяется величиной разности глубин охлаждения θ_{c+II} и θ_c .

В качестве приближенного метода получения оценок показателей температурной эффективности ТЗП конвективно охлаждаемой стенки про-

извольного профиля предложена ее кусочная аппроксимация конвективно охлаждаемыми бесконечными стенками простейшей формы, в частности, плоской с одно- и многослойными ТЗП.

Для указанных стенок получены замкнутые решения в критериях подобия, удобные для выполнения оптимизационных расчетов и выводов при проектировании ТЗП в составе конкретных теплоэнергетических машин и устройств.

Перечень ссылок

1. Clark D.R. Enhanced Zirconium Thermal Barrier Coating Systems / D.R. Clark, C.G. Levi,

A.G. Evans // Journal of Power and Energy, Proc. I. MechE. – 2006. – №220. – P. 85-92.

2. Ануров Ю.М. Работоспособность теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД: учебное пособие / Ю.М. Ануров, Д.Г. Федорченко. - Самара: СГАУ, 1996. – 53 с.

3. Авдеевский В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике / Авдеевский В.С., Данилов Ю.И.: под ред. В.К. Кошкина, В.С. Авдеевского. - М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.

Поступила в редакцию 01.07.2010 г.

D.F. Simbirsky, A.G. Dobrovolsky

THERMAL EFFICIENCY OF THERMAL BARRIER COATINGS SPREAD ON THE HIGH-TEMPERATURE AND CONVECTION COOLING COMPONENTS

Запропоновано загальний підхід для визначення температурної ефективності теплозахисних покриттів (ТЗП), нанесених на стінки високо нагрітих деталей, що охолоджуються різними способами. Для конвективної схеми охолодження плоских стінок з одно- або багат шаровими ТЗП отримані замкнуті рішення у критеріальній формі для наближеного визначення показників температурної ефективності ТЗП на стінках довільної форми, а також для виконання оптимізаційних розрахунків та висновків при проектуванні ТЗП у складі конкретних теплоенергетичних машин та пристроїв.

Конвективне охолодження, стінка деталі, теплозахисне покриття (ТЗП), температурна ефективність ТЗП

This paper offers the common approach for the definition of the thermal efficiency of thermal barrier coatings (TBC) spread on the high-temperature and cooling in different ways components' plates. Closed solutions for the convective cooling systems for case of plane plate with one- or multilayer TBC were obtained in the criterion form for the approximate definition of the TBC thermal efficiency's rates on the plates of different forms, and also for the execution of optimizing calculations and resumes during the TBC designing composed of concrete thermal engines and devices.

Convective cooling, component plate, thermal barrier coating, thermal efficiency of barrier coating.