

ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЕЗОБЖИГОВЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПО- КРЫТИЙ

д.т.н., проф. И.М. Приходько, А.Л. Винник

В статье на основании результатов проведенных экспериментальных исследований неразрушающихся безобжиговых керамических теплозащитных покрытий предложена двухпараметрическая зависимость коэффициента теплопроводности данных материалов от их средней температуры для различной пористости.

Постановка проблемы. Наибольшие перспективы в ближайшем будущем будут иметь высокотемпературные материалы на основе керамики. На это указывает повышенный интерес к материалам данного типа и заметное улучшение их качества в последние 15 – 20 лет [1]. На основании работ [2, 3] может быть сделан вывод о том, что для некоторых вспомогательных ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) вместо разрушающихся теплозащитных покрытий (ТЗП) более приемлемо использовать неразрушающиеся безобжиговые керамические ТЗП. Однако отсутствие необходимых данных о значениях коэффициента теплопроводности в зависимости от пористости, не дает возможности проводить расчеты теплового состояния несущих металлических оболочек камер сгорания РДТТ. Следовательно, возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований с целью определения коэффициента теплопроводности данных материалов при различной пористости и средней температуре ТЗП и вывода общей зависимости.

Анализ литературы. Из работ [4, 5] известны зависимости коэффициента теплопроводности безобжиговых керамических ТЗП от температуры. Однако отсутствие данных о величине пористости данных материалов не дает возможности проводить расчеты теплового состояния несущей конструкции РДТТ, защищенной безобжиговым керамическим ТЗП.

Цель статьи. Получить аналитическую двухпараметрическую зависимость коэффициента теплопроводности безобжиговых керамических ТЗП от средней температуры при различной пористости. Для этого необ-

ходимо по полученным в экспериментах данным о скорости (V_r) газового потока и его температуре (T_r), пористости (Π) ТЗП, температуре (T_p) на границе ТЗП и металла, температуре (T_n) на поверхности металла и известным значениям коэффициента теплопроводности (λ_m) металла рассчитать по известным аналитическим зависимостям величину коэффициента теплопроводности (λ_n) ТЗП.

Раздел 1. Определение плотности и пористости образцов. Для определения пористости испытуемых ТЗП образцы были разрушены. Пористое покрытие разрезалось на прямоугольные элементы различной длины, ширины и толщины. Обработанные элементы пористого ТЗП взвешивались на аналитических весах и измерялись при помощи штангенциркуля. Затем при помощи объемно-весового метода находились их плотность и пористость соответственно:

$$\rho_{\text{пор}} = m/V; \quad \Pi = \frac{m - \rho_k \cdot V}{(\rho_b - \rho_k) \cdot V},$$

где m – масса элемента, кг; ρ_k – плотность самой керамики, равная 2585 кг/м^3 ; ρ_b – плотность воздуха, находящегося в порах ТЗП, равная $1,2 \text{ кг/м}^3$; V – объем элемента, м^3 . По результатам расчетов средняя плотность для образцов одинаковой пористости, испытанных в первой серии экспериментов, равна 1418 кг/м^3 , а средняя пористость – $0,45$. По результатам расчетов средняя плотность для образцов одинаковой пористости, испытанных во второй серии экспериментов, равна 1549 кг/м^3 , а средняя пористость – $0,4$.

Раздел 2. Определение коэффициента теплопроводности пористого материала. Так как температура и скорость газового потока поддерживались в процессе экспериментов постоянными, то можно считать, что условия воздействия газового потока на ТЗП образцов – стационарные.

По известным данным при помощи аналитических зависимостей определим коэффициент теплопроводности покрытия при среднем значении температуры ТЗП, равным $T_{cp} = (T_{s1} + T_p)/2$ [6], где T_{s1} – температура на поверхности ТЗП, обдуваемой газовым потоком; T_p – температура на границе ТЗП и металла.

Будем считать, что между слоями ТЗП и металла имеет место идеальный тепловой контакт, а температура изменяется вдоль одной координаты. В этом случае тепловой поток, проходящий через любую изотермическую поверхность тела, одинаковый: $Q = \text{const}$.

Так как для образцов выполняется условие $(\delta_n + \delta_m)/R \ll 1$ [7], то они в тепловом отношении могут быть представлены как неограниченные плоские пластины. Следовательно, в силу постоянства тепловых потоков на изотермических поверхностях для внешней границы образца,

омываемой газовым потоком, можно записать [8]:

$$Q = \alpha S (T_g - T_{s1}), \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от газового потока к ТЗП.

Такой же тепловой поток передается через слой ТЗП и металла. Тогда в соответствии с законом Фурье:

$$Q = \lambda_n S (T_{s1} - T_p) / \delta_n; \quad (2)$$

$$Q = \lambda_m S (T_p - T_n) / \delta_m, \quad (3)$$

где δ_n и δ_m – толщина ТЗП и металлической стенки соответственно.

Площадь каждого слоя одинакова, следовательно, удельный ($q = Q/S$) тепловой поток можно найти из (3). Подставив полученное значение в (1), найдем T_{s1} и затем по (2) находим коэффициент теплопроводности ТЗП.

Согласно работе [6] эти значения относятся к среднему значению температуры ТЗП.

Проведем расчет коэффициента теплопроводности ТЗП для различных температур, измеренных при проведении экспериментов. Сведем расчеты для образцов пористостью 0,45 в табл. 1, а для образцов пористостью 0,4 в табл. 2.

Таблица 1

Расчеты величин T_{cp} и λ_n для образцов пористостью 0,45

T_{cp}	1065	1123	1183	1224	1250	1282
λ_n	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,14

Таблица 2

Расчеты величин T_{cp} и λ_n для образцов пористостью 0,4

T_{cp}	1049	1049	1049	1049	1049
λ_n	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38

Раздел 3. Двухпараметрическая зависимость коэффициента теплопроводности безобжиговых керамических ТЗП различной пористости. Отобразив полученные значения на графиках, построили зависимости $\lambda_n = f(T_{cp})$, аппроксимировав данные значения прямолинейной зависимостью методом наименьших квадратов [9]. По полученным формулам, путем несложных математических преобразований рассчитали двухпараметрическую зависимость коэффициента теплопроводности безобжиговых керамических ТЗП от средней температуры ТЗП с различной пористостью

$$\lambda_n = (4,615 - 8,4 \cdot \Pi) - (0,0033 - 0,0061 \cdot \Pi) \cdot t_{cp}.$$

Выводы. Полученная зависимость позволяет достаточно просто производить выбор безобжиговых керамических ТЗП, определенной по-

риности и коэффициента теплопроводности, для проведения расчетов теплового состояния несущей конструкции камер сгорания вспомогательных РДТГ, защищенных данными ТЗП, при заданной допустимой температуре металлической стенки.

Однако существует необходимость в проведении дополнительных экспериментов с ТЗП данного типа пористостью 0,1, 0,2, 0,3, 0,5 и 0,6. Полученные результаты важны для получения уточненной двухпараметрической зависимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Проведение моторных и лабораторных испытаний деталей из новых материалов: Отчет о НИР / Институт физико-технических проблем энергетики. – Каунас, 1988. – 27 с.*
2. *Приходько И.М., Ведь В.Е., Винник А.Л., Дуреев В.А. Теплозащитные керамические покрытия камер сгорания ракетных двигателей твердого топлива // Системы обработки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 2(18). – С. 76 – 79.*
3. *Винник А.Л. Использование керамических теплозащитных покрытий для вспомогательных ракетных двигателей твердого топлива // Системы обработки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вып. 4(20). – С. 132 – 137.*
4. *Мацевитый Ю.М., Ведь В.Е., Иванов В.А., Лушпенко С.Ф. Разработка безобжиговых теплоизолирующих материалов для высокотемпературных покрытий металлов // Доповіді Національної академії наук України. – К.: Президія Національної академії наук України. – 1998. – № 10. – С. 112 – 117.*
5. *Ведь В.Е. Оценка эффективности тепловой изоляции головок цилиндров двигателей внутреннего сгорания // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: ХДПУ. – 1999. – № 2. – С. 81 – 85.*
6. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.*
7. *Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В. Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.*
8. *Беляев Н.М. Основы теплопередачи. – К.: Выща школа, 1989. – 343 с.*
9. *Мартин Ф. Моделирование на вычислительных машинах: Пер. с англ. – М.: Сов. радио», 1972. – 288 с.*

Поступила 12.06.2003

ПРИХОДЬКО Иван Михайлович, докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры Харьковского военного университета. Область научных интересов – тепло-массообмен в ракетной и космической технике.

ВИННИК Алексей Леонидович, адъюнкт очной адъюнктуры при Харьковском военном университете. В 1988 году окончил Ростовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск. Область научных интересов – тепловая защита конструкций.