

## ПОЛУПРОЗРАЧНОЕ ТЕПЛОЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ С ОТРАЖАЮЩИМ ОКСИДИРОВАННЫМ ПОДСЛОЕМ

В.Г. Мерзликин<sup>1</sup>, А.А. Бекаев<sup>1</sup>, В.Г. Сутугин<sup>2</sup>, Ю.А. Кузнецов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>МГМУ (МАМИ), Москва  
e-mail: MerzlikinV@mail.ru;

<sup>2</sup>ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга, Москва;

<sup>3</sup>МГТУ им. А.Н. Косыгина, Москва

*Проанализировано влияние оптических и терморadiaционных характеристик теплозащитного материала с поверхностным полупрозрачным теплоизолирующим покрытием на терморегуляцию стенок камеры сгорания дизеля. Использована разработанная авторами методология физико-математического моделирования параметров кондуктивно-радиационного теплопереноса и формирования переходных (стационарных) температурных полей. Рассмотрены временные температурные распределения в модельном многослойном теплозащитном материале.*

**Ключевые слова:** теплозащитный материал, полупрозрачное теплоизолирующее покрытие, рассеяние, поглощение, объемный нагрев, быстроходный дизель.

## SEMITRANSSPARENT THERMAL BARRIER COATING WITH REFLECTIVE OXIDIZED SUBLAYER

V.G. Merzlikin<sup>1</sup>, A.A. Bekaev<sup>1</sup>, V.G. Sutugin<sup>2</sup>, Yu.A. Kuznetsov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MAMI Moscow State Mechanical University, Moscow  
e-mail: MerzlikinV@mail.ru;

<sup>2</sup>Berg Central Research Radio Engineering Institute, Moscow;

<sup>3</sup>Kosygin Moscow State Textile University, Moscow

*Influence of optical and thermal radiative characteristics of the thermal barrier material with the surface semitransparent heat-insulating coating on the thermal regulation of walls of the diesel combustion chamber is analyzed. The methodology of physical-mathematical simulation of parameters of the conductive-radiative heat transfer and formation of transitional (stationary) temperature fields is used which was developed by the authors. The temporal temperature distributions in the model multilayer thermal barrier material are discussed.*

**Keywords:** thermal barrier material, semi-transparent heat-insulating coating, scattering, absorption, volume heating, high-speed diesel.

Наиболее успешные разработки теплозащитных материалов (ТЗМ) и теплозащитных покрытий (ТЗП) на их основе, получивших также название термобарьерных покрытий (thermal barrier coatings — ТВС), проводились в аэрокосмических отраслях СССР и США в 1960-е гг. [1, 2]. Подобные исследования были начаты в 1980-е гг. в автомобильной промышленности тех же стран, а также Японии, Германии при создании двигателей внутреннего сгорания (ДВС) (быстроходных дизелей) с низкими тепловыми потерями (нередко называемыми адиабатными, но не из-за физического механизма теплообмена, а в связи ожидаемой предельно возможной эффективностью). С этой целью

разрабатывались аналогичные по своим характеристикам теплоизолирующие покрытия, которые не получили дальнейшего развития из-за незначительного роста КПД и существенного роста токсичных выхлопных газов на основе диоксидов азота при высоких температурах стенок камеры сгорания [3, 4].

Основной характеристикой керамических и композиционных ТЗМ и ТЗП, определяющей эффективность их применения в различных теплоэнергетических устройствах, является долговечность, т.е. время, в течение которого термостойкий материал (покрытие) будет выполнять свои теплозащитные (теплоизолирующие) функции. Эту задачу решают различные комбинированные покрытия, которые также позволяют улучшить коррозионную стойкость и механическую прочность. Последняя характеристика становится решающим фактором при эксплуатации элементов камер сгорания ДВС и гидротурбинных двигателей (ГТД), лопаток турбин. Современные технологии (APS, EB-PVD) поверхностного оксидирования и другие позволяют создать многослойное ТЗП с более равномерным изменением коэффициента термического расширения, начиная от металлической подложки с нанесенными на нее связующим и диффузным керамико-металлическими слоями и заканчивая поверхностным керамическим слоем, который сможет успешно выполнять теплозащитные функции при сложной конвективно-радиационной нагрузке [5–7].

Эффективность неразрушающейся тепловой защиты обычно связывают с низкой теплопроводностью [3–5, 8–12]. Однако, начиная с 1990-х гг. возникла необходимость создания новых ТЗП, обеспечивающих комбинированную тепловую защиту элементов ДВС [6], и ГТУ [13, 14] при интенсивном действии радиационно-конвективного потока с суммарной плотностью до  $\sim 1 \dots 2 \text{ МВт/м}^2$  и долей лучистой компоненты, составляющей  $\sim 50\%$ , для дизелей [15, 16] (соответственно до  $100 \text{ кВт/м}^2$  и  $\sim 30\%$  для турбин [17]). Для создания ТЗП от воздействия интенсивного излучения [1, 2] как в авиационной, так и в автомобильной промышленности совершенствуются оксидные керамические покрытия малой теплопроводности, но требование придания свойств полупрозрачности теплоизолирующим покрытиям (ПТИП) еще не стало осознанной необходимостью. Хотя применяемые оксидные керамические теплоизолирующие покрытия независимо от задач исследователей позволяют использовать их характеристики селективного поглощения и рассеяния в ближней ИК области спектра (коротковолновый (КВ) диапазон длин волн в совокупности с поверхностным поглощением излучения в длинноволновом (ДВ) диапазоне (рис. 1, 4-я полоса обложки).

Основная особенность полупрозрачных конструкционных материалов, которую необходимо учитывать при рассмотрении процессов лучистого теплопереноса, — это оптическая неоднородность, обусловленная наличием микроскопических инородных объектов, частиц, пор, флуктуаций плотности, комплексный показатель преломления которых отличается от соответствующих значений связующей среды. В отличие от оптически однородных материалов в неоднородных, кроме поглощения излучения имеет место и рассеяние электромагнитных волн на оптических неоднородностях полидисперсной среды с определенной функцией распределения неоднородностей по размерам. Таким образом, проникающее излучение поглощается в зависимости от оптических свойств среды, а при длине волны электромагнитного излучения, сравнимого с эффективным размером инородных объектов, — рассеивается. В микроскопическом приближении, когда существенны дифракционные эффекты, свойства рассеивающей среды характеризуются показателями поглощения ( $\kappa_\lambda$ ) и рассеяния ( $\sigma_\lambda$ ). Нередко, особенно в зарубежной литературе, их называют коэффициентами, но тогда следует корректировать терминологию, чтобы не использовать одинаковые названия для различных характеристик. Например, это касается безразмерного коэффициента поглощения (поглощательной способности) — как отношения поглощенного и падающего потоков излучения. Для решения уравнений теплопроводности важны размерные параметры, которые можно рассчитать, используя экспериментально измеренные спектрофотометрические (отражательную  $r(H)$ , пропускательную  $\tau(H)$  и излучательную  $\varepsilon_w$ ) способности плоских образцов материалов с толщиной  $H$  [18, 19].

Частичная прозрачность среды обуславливает исключительное своеобразие процессов теплопереноса. При действии внешних источников излучения нагреву подвергается не только поверхность (в области непрозрачности), но и прилегающий к облучаемой границе подповерхностный слой конечной толщины. Так, при воздействии мощного потока излучения на непрозрачные материалы происходит нагрев с отрицательным градиентом температур, который при определенных температурах сопровождается поверхностным плавлением (испарением или сублимацией). При действии излучения на полупрозрачные материалы (особенно коллимированного излучения) при определенном соотношении теплофизических и оптических параметров и граничных условиях теплообмена развивается перегрев внутренних слоев относительно поверхности. В отличие от поверхностного нагрева непрозрачных материалов в полупрозрачных может формироваться подповерхностный температурный максимум с положительным приповерхностным градиентом температур. Указанный

эффект обуславливается “замораживанием” температуры на облучаемой поверхности при больших энергозатратах на фазовые переходы, а также возможным эффектом расфокусировки направленного потока излучения. Таким образом, терморadiационная обработка керамик как полупрозрачных материалов может обеспечить дополнительную подповерхностную термообработку при согласовании спектра теплового источника и полосы прозрачности облучаемого материала, а также длительности теплового импульса излучения [20].

Аналогичные эффекты имеют место при воздействии лучистой компоненты на керамическую теплоизоляцию стенок камер сгорания ДВС, теплозащитные покрытия лопаток авиационных турбин и др. Однако для достижения указанного эффекта требуется снизить поглощение ПТИП вследствие контроля технологического процесса нанесения более чистого по составу поверхностного слоя керамики.

В МГМУ (МАМИ) с 2000-х гг. начались исследования по созданию ПТИП для камер сгорания быстроходных дизелей и ДВС с применением гомогенных топливных смесей. Были проведены экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик дизеля ТМЗ-450Д (1С 80/85), в камере сгорания которого был использован поршень с покрытием из  $ZrO_2 + 8\%Y_2O_3$ . Показано улучшение до 5% теплоэнергетических показателей дизеля в диапазоне частот вращения от 2800 до 3400  $\text{мин}^{-1}$  [21].

В настоящей работе рассматривается многослойный ТЗМ (покрытие) (рис. 2, 4-я полоса обложки) [22], предназначенный для теплоизоляции камеры сгорания быстроходного дизеля, состоящий из поверхностного слоя селективно излучающего в ДВ диапазоне, рассеивающего и поглощающего в КВ диапазоне спектра полупрозрачного теплоизолирующего покрытия на основе стабилизированного оксида циркония, нанесенного на отражающий диффузный барьерный подслоя из оксида алюминия. Этот подслоя может наноситься электрохимическим методом оксидирования предварительно напыленного алюминия на поверхность связующего интерметаллидного слоя металлических стенок камеры сгорания, лопаток турбин. Поверхностный керамический ПТИП в начале процесса нанесения (EBPVD-технологии) в своих нижних слоях может смешиваться с частицами корунда заданного фракционного состава для снижения градиента изменения коэффициента термического расширения.

Был проведен расчет формируемых температурных распределений в ПТИП, защищающих стенки камеры сгорания быстроходного дизеля с частотой вращения 3000  $\text{мин}^{-1}$ . В дизельных двигателях температура рабочего тела изменяется от 300 до  $\sim 2000$  К, что зависит от гармонического движения поршня; время сгорания соответствует  $60^\circ$

(при длительности одного такта  $180^\circ$ ) от общего цикла  $720^\circ$  угла п.к.в. Но основная доля энергии излучения и турбулентного конвективного теплового потока при взрыве (горении) топливной смеси сосредоточена в еще более узком пике шириной  $\sim 10^\circ$  ( $\sim 2$  мс) индикаторной диаграммы. Этот период времени впервые определил немецкий инженер Вошни и назвал его “конвективным всплеском” [3], но не указал на возможное присутствие аналогичной лучистой компоненты, на существование которой указывали советские и немецкие специалисты еще в 1960-х гг. [15, 16].

Процессы выпуска отработанных газов, впрыска топливно-воздушной смеси, последующего сжатия, т.е. холодная фаза принята длительностью 0,030 с. В качестве внешних условий теплообмена рассмотрены модельные циклические изменения конвективно-радиационной нагрузки по гармоническому закону. Для воздействующего КВ потока излучения  $q_0(t)$  принимались значения от  $1 \text{ кВт/м}^2$  до  $1 \text{ МВт/м}^2$  с максимумом в промежутке времени на порядок меньше всего периода горячей фазы. Газовая атмосфера в камере сгорания определялась также следующими синфазно изменяющимися характеристиками: излучательной способностью  $\varepsilon_A(t) = 0,4 \dots 0,6$  и коэффициентом турбулентной теплоотдачи  $\alpha_T(t) = 200 \dots 2000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  [4, 23]. Однако время сгорания (горячая фаза), равное  $\sim 0,010$  с, судя по различным публикациям, можно рассматривать как изменение температуры  $T_A(t)$  газовой атмосферы в указанных выше пределах [3, 4, 8, 9, 23, 24].

Время запаздывания указанных процессов (сдвиг по фазе) до сих пор является предметом прецизионных измерений, оно зависит от многочисленных факторов и условий стендовых испытаний и является актуальной задачей современных исследований [3, 4, 8, 9, 23, 25].

Для материалов с высоким показателем поглощения  $\kappa_\lambda > 10^4 \text{ м}^{-1}$  в КВ области радиационный нагрев происходит на облучаемой границе. У таких материалов лучистый объемный прогрев отсутствует, функция внутреннего лучистого теплового источника практически не меняется с ростом толщины такого покрытия ( $F_{op}(x) = 0$ ), т.е. подобные среды рассматриваются как непрозрачные. В этом случае нагрев происходит на фронтальной границе  $x = 0$  под действием конвективного и лучистого тепловых потоков, причем основная доля излучения может приходиться на КВ область спектра излучения раскаленных частиц сажи.

Для материалов с малым показателем поглощения поверхностный керамический слой ПТИП определяет объемное отражение, пропускание и частичное поглощение излучения, а все нижние подслои в

виде оксидированной керамики-металлической подложки обуславливают поверхностное спектральное отражение  $R_{s,\lambda}$  и поглощение в КВ области спектра. Тогда многослойный ТЗМ с полупрозрачным поверхностным слоем может моделироваться как оптическая система в виде ПТИП с граничными условиями на своей тыльной поверхности, облученной проникающим и отраженным от подслоя лучистым потоком. При анализе непрозрачного ТЗП оптические свойства подложки не играют роли (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Теоретические и экспериментальные [19] оптические параметры в КВ и ДВ диапазонах для плоских керамических образцов ПТИП на основе стабилизированного оксида циркония для различных оптических моделей**

Оптические модели ПТИП $M(\kappa/\sigma; A\%)$ в ближней ИК области	$\kappa, \text{м}^{-1}$	$\sigma, \text{м}^{-1}$	$r(H \rightarrow \infty)/r(H=0,5 \text{ мм})$	Излучательная способность в средней ИК области
$M1(10/500; 75)$	10	500	0,750/0,11	Менее 0,98
$M2(10/1000; 82)$	10	1000	0,819/0,20	
$M3(10/2000; 87)$	10	2000	0,868/0,33	
* $M_{ex}(14/2400; 89, 5)$	14	2400	0,898/0,37	

Уравнения теплопроводности для рассматриваемых моделей теплозащитного материала как полупрозрачного или непрозрачного покрытий, толщиной  $H$  относительно температурных распределений  $T_{se}(x, t)$  и  $T_{op}(x, t)$  имеют вид

$$c_{se}\rho_{se} \frac{\partial T_{se}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{T,se} \frac{\partial T_{se}}{\partial x} \right) + \sum_{\lambda} \left( F_{se}(x, t, \kappa_{\lambda}, \sigma_{\lambda}, R_{s,\lambda}, r_{\lambda}(H), \tau_{\lambda}(H), q_{0\lambda}(t)) \right);$$

$$c_{op}\rho_{op} \frac{\partial T_{op}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{T,op} \frac{\partial T_{op}}{\partial x} \right),$$

где  $c, \rho, K_T$  – теплофизические характеристики для обеих оптических моделей;

$$F_{se,\lambda}(x, t) = q_{0\lambda}(t) \frac{(1 - A_{\lambda})b_{\lambda}}{1 - A_{\lambda}^2 \exp(-2 \cdot b_{\lambda}H)} \times \left\{ \exp(-b_{\lambda}x) - A_{\lambda} \exp[b_{\lambda}(x - 2H)] + \frac{\tau_{se,\lambda}(H)R_{s,\lambda}}{1 - r_{se,\lambda}(H)R_{s,\lambda}} [e^{-b_{\lambda}(H-x)} - A_{\lambda}e^{b_{\lambda}(H-x-2H)}] \right\}$$

– функция внутреннего радиационного источника с учетом отражения от подложки для КВ области;  $A_{\lambda} = r_{\lambda}(H \rightarrow \infty) = (b_{\lambda} - \kappa_{\lambda}) / (b_{\lambda} + \kappa_{\lambda})$  – отражательная способность полубесконечного слоя (альбедо) ( $H \rightarrow \infty$ ) облучаемого полупрозрачного материала;  $b_{\lambda} =$

$= \sqrt{\kappa_\lambda^2 + 2\kappa_\lambda\sigma_\lambda\beta_\lambda}$  – эффективный показатель ослабления среды со сферической индикатрисой рассеяния ( $\beta = 0,5$  в двухпоточковом приближении [6]).

Граничные условия на фронтальной поверхности для непрозрачного теплоизолирующего покрытия определяются конвективным и радиационным тепловыми воздействиями. Коротковолновая и длинноволновая компоненты лучистого теплового потока поглощаются на облучаемой поверхности с соответствующими спектральными и интегральными коэффициентами поверхностного отражения  $R_{op\lambda} \sim 0,2$  и  $R_{op\Sigma} = 1 - \varepsilon_{op\Sigma}$  и эффективным коэффициентом излучательной способности для газовой атмосферы и нагреваемой стенки камеры сгорания:

$$-K_T \frac{\partial T_{op}(0, t)}{\partial x} = \alpha_T(t) (T_A(t) - T_{op}(0, t)) + \varepsilon_{ef}(t)c_0 [T_A(t)^4 - T_{op}(0, t)^4] + \sum_{\lambda} q_{0\lambda}(t)(1 - R_{op\lambda}).$$

Граничные условия на фронтальной грани полупрозрачного ПТИП определяются влиянием конвективных и только ДВ поверхностно поглощающихся потоков излучения. Однако на фронтальной грани оксидированной керамико-металлической подложки  $x = H$  формируется поток теплоты, обусловленный излучением, значение которого определяется коэффициентом отражения  $R_{s,\lambda}$  в КВ диапазоне, проникающего через полупрозрачное покрытие с коэффициентами пропускания  $\tau_{se}(x)$  и отражения  $r_{se}(x)$ . Тогда граничное условие на тыльной поверхности полупрозрачного слоя с непрозрачной подложкой с учетом многократного отражения имеет вид

$$K_{T,se} \frac{\partial T_{se}(x = H)}{\partial x} = \frac{\sum_{\lambda} q_0(t)(1 - R_{s,\lambda})\tau_{se}}{1 - \sum_{\lambda} R_{s,\lambda}r_{se}} - q_{cool}(t),$$

где  $q_{cool}(t)$  – охлаждающий конвективный тепловой поток с коэффициентом теплоотдачи, принятым равным  $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Используя разработанные оптические модели полупрозрачных и непрозрачных покрытий, вычисляли радиационные и температурные поля в керамических покрытиях на основе измерений оптических характеристик стабилизированного диоксида циркония фирмы SIGMUND LIDNER GmbH, ФРГ [6, 19] (см. табл. 1 и 2). Сложный теплообмен в камерах сгорания быстроходных дизелей вызывает поверхностный нагрев фронтальной грани до  $(T_{op})_{\max} = 330 \dots 340 \text{ К}$  для непрозрачных покрытий в течение одного периода горячей и холодной фаз в начальный момент радиационно-конвективной нагрузки. Имеются два пика, обусловленные кратким (2 мс) временем воздействия КВ излучения, турбулентной теплоотдачи и ДВ излучения и

Таблица 2  
**Модельные оптические характеристики полупрозрачных и непрозрачных материалов и покрытий**

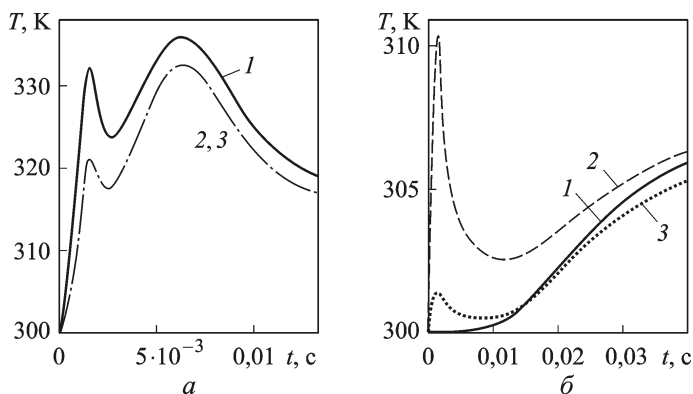
Оптические характеристики	Тип материала		
	Полупрозрачный	Непрозрачный	Непрозрачный
	Оптические модели $M(\kappa/\sigma; A\%)$ рассеивающих и поглощающих ПТИП с объемным отражением слоя толщиной 0,5 мм	Покрытия и материалы с граничным отражением	
	Теплоизолирующие покрытия		
	$M1(10/500; 75)$	$M2(10/1000; 82)$	$M3(10/2000; 87)$
$r(H), \%$	11,1	19,9	33,2
$a(H), \%$	0,5	0,5	0,5
$\tau(H), \%$	88,4	75,9	66,3
			Незащищенная покрытием металлическая стенка $R_s, \%$
		$\sim 20$	Менее 90
		$\sim 80$	Более 10
		0	0



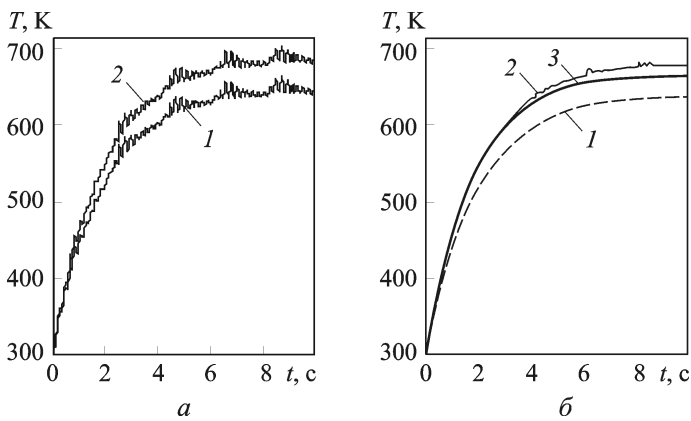
максимумом (10 мс) времени воздействия температуры рабочего тела, моделируемой с более широким пиком за 10 мс. (Параметры максимальной тепловой нагрузки в период горячей фазы моделируются гармоническими функциями за время 2 мс (“конвективного всплеска” по терминологии Вошни [3]) и составляют для терморadiационного потока до  $1 \text{ МВт/м}^2$  в КВ диапазоне, турбулентного коэффициента теплоотдачи —  $2000 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , коэффициента черноты в ДВ диапазоне — 0,6 [5].)

Применение ПТИП (оптические модели М2, М3) позволяет снизить на 5...10 К температуру (рис. 3, а) за счет увеличения от 20 до 33 % не только отражательной способности, но и спад от 75 до 66 % пропускательной способности. Это дает возможность помимо уменьшения поглощенного потока КВ излучения обеспечить прогрев подповерхностной области, снизив при этом и температуру поверхности, и неизбежные температурные градиенты. Применение же непрозрачного покрытия позволяет проводить терморегуляцию стенок камеры сгорания только за счет изменения теплофизических характеристик.

Нагрев тыльной поверхности ПТИП также отличается хотя и большей температурой в начальный период воздействия радиационно-конвективной нагрузки, но к концу 40-миллисекундного импульса нагрева температура может быть понижена за счет более высокого значения коэффициента отражения подложки. В качестве отражающего материала может быть использован оксидированный алюминий,



**Рис. 3.** Временное изменение температуры фронтальной (а) и тыльной (б) поверхностей непрозрачного (кривая 1) и полупрозрачного с оптической моделью М2(10/1000;82) (кривые 2 и 3) ТЗП, нанесенных на поверхность оксидированный интерметаллидный связующий слой с коэффициентами отражения 90 % (кривая 2) и 10 % (кривая 3), нанесенного на внутренние стенки камеры сгорания для 4-тактного движения поршня быстроходного двигателя ( $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ ) в условиях радиационно-конвективного воздействия за время 10 мс для горячей фазы (сгорание воздушно-топливной смеси) с изменяющейся температурой продуктов сгорания до 2000 К и 30 мс холодной фазы (выхлоп, сжатие) модельной индикаторной диаграммы



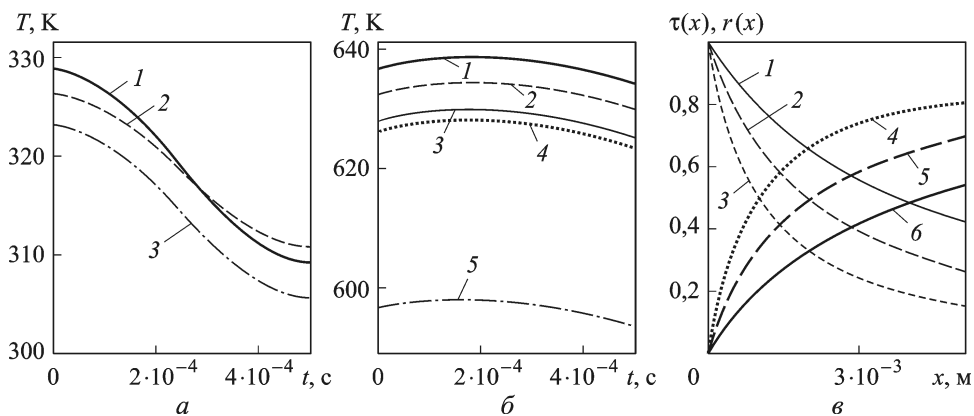
**Рис. 4.** Временное изменение температуры (с переходом в стационарный режим) фронтальной (а) и тыльной (б) поверхностей ПТИП оптической модели М2(10/1000;82), нанесенного на оксидированную керамико-металлическую подложку с коэффициентами отражения 90 % (кривая 1) и 10 % (кривая 2) для внутренних стенок камеры сгорания при циклической радиационно-конвективном воздействии; кривая 3 — для непрозрачного покрытия

который давно себя зарекомендовал как важный элемент, обеспечивающий лучшие теплопрочностные свойства ТЗМ и согласование коэффициентов термического расширения интерметаллидных и поверхностных керамических слоев. Кроме того, он способствует снижению пористости интерметаллидного слоя при его электрохимическом оксидировании.

Стационарный режим прогрева стенок камеры сгорания с ТЗП достигается за 8...10 с (рис. 4). Рассмотрим прогрев облучаемой и тыльной граней ПТИП. Более высокое значение коэффициента отражения подложки ( $R = 90\%$ ) для модели М2 становится преобладающим фактором формирования температурного профиля, отличающегося на  $\sim 50$  К от температуры ПТИП с подложкой, имеющей  $R = 10\%$ . Соответственно тыльная поверхность ПТИП может иметь меньшую или большую температуру по сравнению с температурой непрозрачного покрытия в пределах 10...30 К.

Процессами формирования температурных и радиационных полей можно управлять, варьируя показатели поглощения и рассеяния ПТИП (рис. 5).

На этом рисунке представлены температурные профили в ПТИП и непрозрачном покрытии при начальном однократном (рис. 5, а) и циклическом (рис. 5, б) нагреве защищенных стенок камеры сгорания. Видна принципиальная разница в нагреве ПТИП и непрозрачных покрытий. Это, прежде всего, уменьшение температуры поверхностного нагрева на  $\sim 30$  К (модель М2 на отражающей подложке). Применение поглощающей подложки может увеличить температуру ПТИП в



**Рис. 5.** Температурные профили за период 40 мс (а), 8 с (б) и оптические характеристики (в) теплоизолирующих покрытий с оптическими моделями  $M(\kappa/\sigma; A)$ , нанесенных на оксидированные подложки с различным граничным коэффициентом отражения  $R$ :

кривые 1 (а) и 3 (б) — непрозрачное покрытие; кривые 2 (а, б) — ПТИП модели М2 на поглощающей подложке,  $R = 10\%$ ; кривые 3 (а) и 5 (б) — ПТИП модели М2 на отражающей подложке,  $R = 90\%$ ; кривая 1 (б) — ПТИП модели М1 на поглощающей подложке,  $R = 90\%$ ; для моделей М1 — кривые 1 и 6 (в), М2 — кривые 2 (в) и 5 (в), М3 — кривые 3 (в) и 4 (в); кривые 1... 3 (в) — коэффициент пропускания; кривые 4... 6 (в) — коэффициент отражения

сравнении с непрозрачным ТЗП. Однако эту температуру можно изменить за счет увеличения показателя рассеяния в 2 раза для модели М3. На рис. 5, в показаны изменяющиеся коэффициенты отражения и пропускания в зависимости от толщины покрытия. Практически можно оптимизировать оптические характеристики в диапазоне их изменения от 20... 30% до 80... 90%. В литературе широко известны и теоретические и экспериментальные работы, связанные с подбором оптимального структурного состава покрытия или модификации свойств отражающей подложки.

**Выводы.** 1. Теоретически показано, что применение ПТИП обеспечивает регулирование и контроль температуры стенок камеры сгорания быстроходного дизеля, а также предотвращение ее перегрева путем выбора оптимальных структурных, оптико-теплофизических и терморadiационных характеристик — сильного рассеяния и малого поглощения, обуславливающих требуемое увеличение коэффициентов отражения и пропускания в КВ диапазоне и излучательной способности — в ДВ диапазоне.

2. Результаты физико-математического моделирования свидетельствуют: чтобы контролировать нагрев поверхности внутренних стенок камеры сгорания, применяя полупрозрачный керамический слой ПТИП, необходимо обеспечить оптимальный баланс спектральных оптических характеристик в интервалах изменения показателей по-

глощения  $\kappa_\lambda = 1 \dots 30 \text{ м}^{-1}$  и рассеяния  $\sigma_\lambda = 100 \dots 3000 \text{ м}^{-1}$ , обеспечивающих значение коэффициентов отражения и пропускания в интервалах  $\sim 5 \dots 60 \%$  и  $\sim 40 \dots \sim 90 \%$ .

3. В полупрозрачных ТЗП в поверхностном керамическом слое за счет поглощения излучения имеет место объемное тепловыделение, что обуславливает более равномерный прогрев, т.е. формирование меньшего градиента температуры по сравнению с непрозрачным покрытием, что облегчает напряженное состояние покрытия.

4. Установление стационарного температурного режима полупрозрачных ТЗП на фронтальной и тыльной поверхностях достигается за несколько секунд импульсно-периодического нагрева при температуре  $\sim 600 \text{ К}$ , что на  $\sim 30 \dots 40 \text{ К}$  ниже, чем для непрозрачных ТЗП в условиях внешнего вынужденного конвективного теплоотвода.

5. Температуру в толще поверхностного полупрозрачного керамического слоя удастся уменьшить не только на фронтальной, но и на тыльной границах за счет увеличения коэффициента отражения как самого слоя, так и его подложки — оксидированного керамико-металлического слоя.

6. Использование полупрозрачных свойств керамических покрытий позволяет приступить к разработке новой технологии подповерхностной термообработки ТЗП при согласовании спектра теплового источника и полосы прозрачности облучаемого материала, а также длительности теплового импульса излучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Howe J. T., Green M. J., Weston K. C. Subliming volumetric reflection materials as thermal barrier coating at combine influence convectional and intensive radiant thermal fluxes // AIAA Journal. NASA Ames research center. Moffet Field, Calif. U.S.A. – 1973. – Vol. 11. No. 7.
2. Петров В. А., Рябцев Е. И., Сутугин В. Г., Мерзликин В. Г. Оптические свойства высокоотражающей керамики // Тематический сб. “Вопросы авиационной науки и техники”. ВИАМ. Сер. Авиационные материалы. – 1989. – С. 39–43.
3. Jaichandar S. and Tamilporai P. Low heat rejection engines – An overview // SAE Technical Paper Series. SAE Word Congress. – Detroit, Michigan. – March 3–6, 2003. – Paper No. 2003-01-0405. – 17 p.
4. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 592 с.
5. Русу И., Георгеску С., Бачиу К., Аурелиан Б. Многослойные термические барьеры, полученные в результате применения APS- и HVOF-технологий // Машиностроение и транспорт. Наук. прац. ВНТУ. – 2009. – № 4.
6. Merzlikin V., Gutierrez Ojeda M., Sidorov O., Timonin V. New selectively absorbing and scattering heat-insulating coatings of the combustion chamber for the low-heat-rejection diesel // SAE Techn. Pap. Ser. – No. 07M-171. – 2007.

7. Heimann R. B. and Lehmann H. D. Recently patented work on thermally sprayed coatings for protection against wear and corrosion of engineered structures // *Recent Patents on Materials Science*. Bentham Sc. Publ. Ltd. – 2008. – No. 1. – P. 41–55.
8. Зуев А. А. О возможности уменьшения теплового потока через поршень тракторного двигателя // *Записки Ленинградского технологического института*. – 1967. – Т. 108. – Вып. 2.
9. Rakopoulos C. D., Giakoumis E. G. Diesel engine transient operation. principles of operation and simulation analysis. e-ISBN 978-1-84882-375-4. Springer-Verlag London Limited, 2009. – 390 p.
10. Лунев А. Н., Абусдель А. М., Ильенкова Т. А. Технология авиационного производства. Применение термобарьерных покрытий в современных газовых турбинах // *Изв. вузов. Авиационная техника*. – Казань: Изд-во КГТУ-КАИ, 2005. – № 5.
11. Осокин В. А., Шпак П. А., Пилюк Е. Л. Перспективы совершенствования конструкций теплозащитных покрытий для лопаток газотурбинных установок // *Перспективные материалы*. – 2008. – № 2. – С. 19–27.
12. Тамарин Ю. А., Качанов Е. Б. Свойства теплозащитных покрытий, наносимых электроннолучевой технологией // *Новые технологические процессы и надежность ГТД*. – М.: ЦИАМ, 2008. – Вып. 7. – С. 125–144.
13. Siegel R. Internal radiation effects in zirconia thermal barrier coatings // *AIAA J. Thermophysics Heat Trans.* – 1996. – Vol. 10, no. 4. – P. 707–709.
14. Manara J., Arduini-Schuster M., Rätzer-Scheibe H.-J. and Schulz U. Infrared-optical properties and heat transfer coefficients of semitransparent thermal barrier coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2009. – Vol. 203. No. 8. – P. 1059–1068.
15. Чирков А. А. Об уровне научных исследований теплопередачи в двигателях внутреннего сгорания // *Ярославский технологический институт // Вестник машиностроения*. – 1962. // – № 6. – С. 112–124.
16. Pflaum W. Die Wärmeübertragung bei Dieselmotoren mit unci ohne Auflager // *Motor Technische Zeitung*. – 1961. – No. 3. – 570 s.
17. Dannecker R., Noll B., Hase M., Krebs W. et al. // Impact of radiation on the wall heat load at a test bench gas turbine combustion chamber: measurements and CFD simulation. [<http://inzhenery.su/slovar/sapr/vliyanie-teploobmenalizlucheniem-na-sumarnyyu-teplovoy-potok-v-stenku-modelnoy-kamery-sgoraniya-gazov.html>]
18. Товстоног В. А., Мосалов Ф. Ф., Мерзликин В. Г. Постановка и решение задач радиационно-кондуктивного теплообмена в многослойных рассеивающих средах // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2008. – № 1. – С. 12–29.
19. Merzlikin V., Sidorov O., Cheranov S., Antonakopoulos N. Optimal spectral optical and thermo radiating characteristics of semitransparent heat-insulating coatings for low-heat-rejection diesel engines // 11th Int. Conference on Engines and Vehicle (ICE2011). 11 September 2011, Capri-Naples, Italy. Book of abstracts, 2011. P. 41. Conference CD-ROM. Paper No. 11ICE-0173. – 10 p.
20. Мерзликин В. Г., Максимов Ю. В., Товстоног В. А., Сидоров О. В. Способ получения полупрозрачного материала. Патент № 2410196. – 2011.
21. Merzlikin V., Cheranov S., Gutierrez M., Tovstonog V., Veselov V., Prediger V. Efficiency and exhaust emission of diesel combustion chamber with semitransparent heat-insulating coatings // FISITA 2012 World Automotive Congress. – Section: Advanced Internal Combustion Engines Beijing. – China. 27th–30th November 2012. – Book of Abstracts. – CD-ROM Paper F2012-A07-005.

22. Мерзликин В. Г., Товстоног В. А. Теплоизолирующее покрытие элементов и узлов камеры сгорания дизельного двигателя. Патент РФ № 2240430. – 2004.
23. Takeshi Sugihara, Kenjiro Shimano, Yoshiteru Enomoto, Yasuko Suzuki, Masahiko Emi. Direct heat loss to combustion chamber walls in a D.I. diesel engine. – 8th Int. Conf. on Engines for Automobile – ICE2007, 16 September. 2007. – Capri – Naples, Italy. Book of abstracts, 2007. P. 6. – Conference CD-ROM, paper No. 2007-24-0006. – 12 p.
24. Петриченко Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та. 1983.
25. Бажайкин А. Н. Характеристики воспламенения и горения топливной струи в теплоизолированных камерах сгорания // Двигателестроение. – 1992.

Статья поступила в редакцию 28.05.2012