

УДК 629.7.023.226

Ю.В. Лощинин¹, С.А. Будиновский¹, М.Г. Размахов¹

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ ОКСИДАМИ РЗМ ПОКРЫТИЙ $ZrO_2-Y_2O_3$, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНЕТРОННЫМ НАНЕСЕНИЕМ

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49

Проведен анализ факторов, влияющих на теплопроводность керамических слоев теплозащитного покрытия (ТЗП) на основе оксидов $ZrO_2-Y_2O_3$. Обсуждены особенности подготовки образцов с использованием двухслойной модели определения теплопроводности ТЗП. Описана методика определения теплопроводности с применением оборудования лазерной вспышки. Приводятся результаты определения термофизических свойств подложки, эффективной теплопроводности двухслойных образцов с керамическим слоем и теплопроводности материалов керамических слоев с различным содержанием оксидов РЗМ.

Показано, что увеличение содержания оксида иттрия с 7,8 до 11% (по массе) снижает теплопроводность керамических слоев ТЗП на 25%. Показано отсутствие влияния различных способов нанесения металлических тонкослойных покрытий, исключая прозрачность керамических слоев, на результаты определения теплопроводности.

Ключевые слова: теплозащитное покрытие, электронно-лучевое и магнетронное нанесение, термоциклическая долговечность, теплопроводность, теплоемкость, кондуктивная и конвективная теплопроводность, метод лазерной вспышки, термическое сопротивление.

Yu. V. Loshchinin¹, S. A. Budinovskiy¹, M. G. Razmakhov¹

HEAT CONDUCTIVITY OF HEAT-PROTECTIVE COATINGS $ZrO_2-Y_2O_3$ ALLOYED BY REM OXIDES OBTAINED BY MAGNETRONNY APPLICATION

The analysis of factors influencing heat conductivity of ceramic layers of heat-protective coating on the basis of $ZrO_2-Y_2O_3$ oxides is carried out. Particularities for preparing samples with the use of two-layered model of determining heat conductivity of heat-protective coatings are discussed. The technique for determining heat conductivity using the equipment of laser flash is described. Results in determining thermophysical properties of substrate, effective heat conductivity of two-layered samples with ceramic layer and heat conductivity of materials of ceramic layers with the different content of REM oxides are presented.

It has been shown that increase in the content of yttrium oxide from 7,8 to 11% (by weight) reduces heat conductivity of ceramic layers of heat-protective coatings by 25%. The article has shown the absence of influence of different methods of applying metallic thin layer coatings excluding transparency of ceramic layers on the results of determination of heat conductivity.

Keywords: heat-protective covering, electron-beam and magnetron application, thermal-fatigue life, heat conductivity, heating capacity, conductive and convective thermal conductivity, method of laser flash, thermal resistance.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Эффективность керамических теплозащитных покрытий (ТЗП), наносимых на детали горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного назначения, определяется способностью длительно противостоять агрессивному высокотемпературному газовому потоку. Применение внешнего керамического слоя (КС) ТЗП при этом обеспечивает прежде всего теплоизоляцию конструкции детали. В условиях эксплуатации КС ТЗП толщиной 127 мкм на металлической поверхности снижает ее температуру на ~190°C. Вместе с тем

ТЗП должно обладать высокой термоциклической долговечностью и высокой твердостью (14 ГПа) поверхности для противодействия эрозионному воздействию. Наиболее приемлемыми для выполнения этих требований являются ТЗП с низким уровнем теплопроводности на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия – $ZrO_2-Y_2O_3$ (YSZ), наносимые на наиболее теплонагруженные рабочие лопатки ГТД [1–10].

Известно, что наилучшее сочетание свойств по термоциклической долговечности, высокой твердости поверхности и низкой теплопроводности

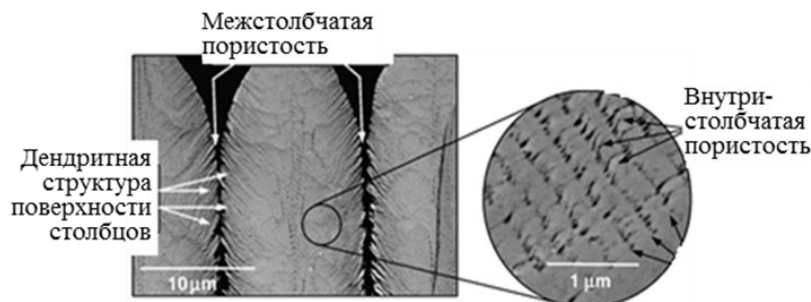


Рис. 1. Микрофотография SEM с изображением структуры с меж- и внутрисклончатой пористостью керамического слоя покрытия YSZ, полученного по технологии EP-PVD [12]

внешнего КС YSZ достигают при его нанесении путем электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме (EP-PVD) благодаря формированию столбчатой микроструктуры, ориентированной перпендикулярно поверхности детали [8, 10–13].

Установлено [13–15], что снижению уровня теплопроводности КС ТЗП YSZ со столбчатой микроструктурой способствует меж- и внутрисклончатая пористость, зависящая в основном от химического состава, толщины и технологических параметров нанесения (рис. 1). При этом существенное значение имеет температура подложки, на которую наносится керамическое покрытие (рис. 2) [13]. При температуре $\geq 850^\circ\text{C}$ столбчатая структура плотная и внутрисклончатая пористость не наблюдается. Теплопроводность такого КС YSZ более чем на 30% выше, чем теплопроводность КС YSZ, нанесенного на подложку с температурой 600°C . Столбчатая структура КС имеет дендритный характер с ярко выраженной внутрисклончатой пористостью [15]. Однако при этом существенно (до 4 раз) снижается термоциклическая долговечность покрытий [13]. С проведением процесса осаждения покрытия по двум режимам – сначала при 850°C , а затем при сниженной до 600°C температуре подложки – можно получить структуру, способную значительно увеличить термоциклическую

долговечность при сохранении низких значений теплопроводности [13].

Следует отметить также влияние на теплопроводность КС температуры эксплуатации ТЗП, нанесенных по EP-PVD технологии. Установлено [13, 14, 16], что при отжиге КС YSZ при 1100°C в течение 100 ч теплопроводность увеличивается до 13% в результате процессов спекания.

Снижению уровня теплопроводности КС на 20–40% способствует также легирование оксидами РЗМ, такими как Nd_2O_3 , Gd_2O_3 , Yb_2O_3 , Sm_2O_3 [2, 17, 18], приводящее к образованию точечных дефектов в кристаллической решетке и уменьшению прозрачности КС. Вместе с тем обнаружено отрицательное влияние на термоциклическую долговечность введения в состав YSZ редкоземельных оксидов [16, 17].

Максимальная рабочая температура поверхности детали с КС YSZ не должна длительно превышать 1200°C из-за спекания и фазовых превращений метастабильной тетрагональной t' -фазы в моноклинную. Однако существует возможность повышения рабочей температуры за счет замещения части диоксида циркония в составе КС оксидом гафния, повышающим температуру структурных преобразований, т. е. происходит стабилизация тетрагональной t' -фазы [18].

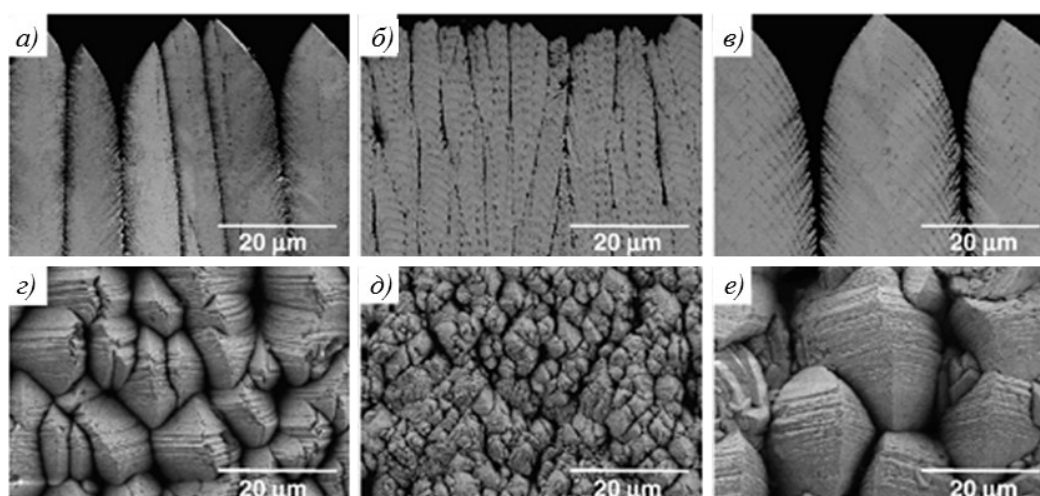


Рис. 2. Микрофотография SEM с изображением средней (а, е), мелкой (б, д) и крупной (в, е) столбчатой структуры керамического слоя покрытий YSZ, полученных при различных параметрах нанесения по технологии EP-PVD [12]

Столбчатая микроструктура КС формируется также с применением перспективной технологии магнетронного нанесения ТЗП, имеющей ряд преимуществ по сравнению с электронно-лучевой технологией [2, 4, 6, 7]. Формирование КС ТЗП на поверхности изделия происходит в результате конденсации оксидов металлического пара, образуемого бомбардировкой мишени из сплава, например, Zr–Y–Gd (Nd, Sm, La) заданного состава ионами аргона после взаимодействия с кислородом аргоно-кислородной плазмы. Подобная технология характеризуется значительным снижением энергопотребления и трудоемкости процесса нанесения ТЗП по сравнению с электронно-лучевым осаждением из паровой фазы.

Оптимальная толщина КС YSZ, обусловленная эффективностью теплозащитных свойств и максимальными напряжениями, возникающими при изгибе керамического столбика структуры на лопатке турбины от центробежных сил и не вызывающими разрушение КС, не должна превышать 120 мкм [13, 19].

Известно, что теплопроводность плотных моно- и поликристаллических оксидных систем ZrO_2 и $ZrO_2-Y_2O_3$ – не менее 2,5–3 Вт/(м·К) [6, 13, 20]. Между тем теплопроводность КС, нанесенных плазменно-воздушным напылением APS, составляет 0,8–1,1 Вт/(м·К) (рис. 3) [5, 12] и определяется слоистой структурой с высокой пористостью, расположенной перпендикулярно к тепловому потоку. Однако механические свойства КС не удовлетворяют требованиям к наиболее нагруженным деталям ГТД, в отличие от КС, полученных по электронно-лучевой или магнетронной технологиям [2, 7, 12, 13]. В связи с этим, наряду с другими преимуществами, работы ФГУП «ВИАМ» [2, 6, 7] по разработке технологии реактивного магнетронного распы-

ления металлических мишеней из сплава Zr–Y–Gd с плазмохимическим синтезом и осаждением оксидов при подаче кислорода являются перспективными для промышленного освоения.

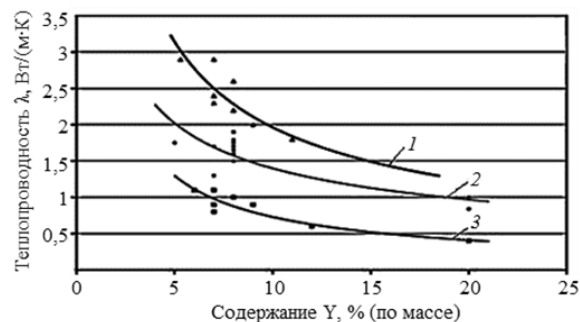


Рис. 3. Теплопроводность плотной керамики ZrO_2 (1) и керамических слоев YSZ (2, 3), полученных соответственно по электронно-лучевой (EP-PVD) технологии или с помощью плазменно-воздушного напыления (APS) в зависимости от содержания иттрия [13]

Оценка эффективности подобной технологии и работы оборудования во многом определяется контролем теплопроводности получаемых КС, так как известно, что в зависимости от параметров режима осаждения по электронно-лучевой или магнетронной технологиям получают различную структуру КС покрытия. Диаметр столбиков, а также меж- и внутри-столбчатая пористость структуры КС сильно влияют на величину теплопроводности [8, 13, 14]. Установлено, что с увеличением толщины КС покрытия с 50 до 350 мкм, полученного по технологии EP-PVD, толщина столбиков увеличивается с 1,5 до 10–15 мкм (рис. 4), что приводит к возрастанию теплопроводности [13–15, 21].

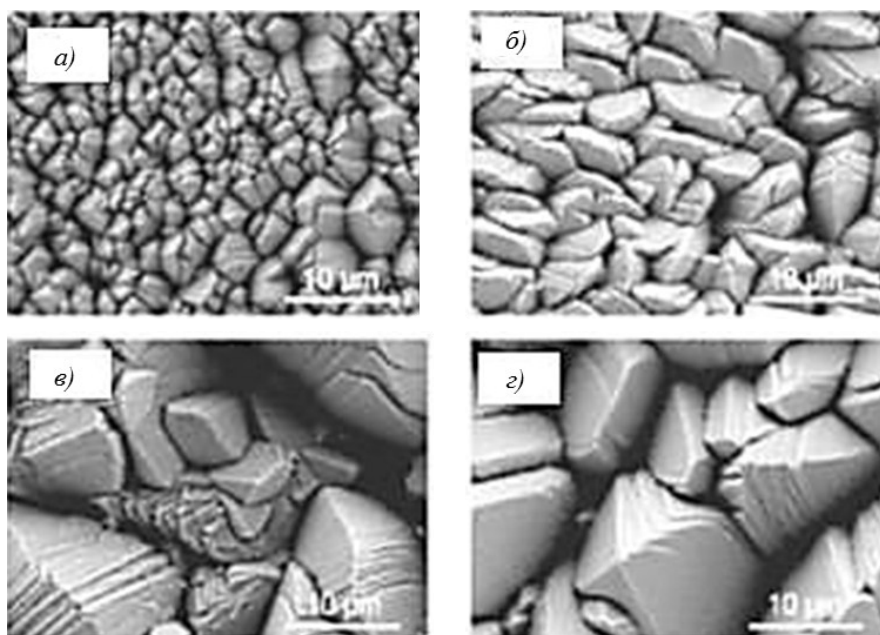


Рис. 4. Микроструктура SEM поверхности покрытия YSZ, полученного по технологии EP-PVD, толщиной 50 (а), 130 (б), 280 (в) и 350 мкм (г) [18]

Кроме того, известно, что теплопроводность может меняться в процессе длительной высокотемпературной эксплуатации из-за спекания или структурных изменений [14, 16], поэтому оценка изменения теплопроводности покрытий при длительных испытаниях является важнейшей характеристикой при конструировании данных покрытий.

Исходя из результатов многих исследований теплопроводность КС ТЗП, полученных по технологии EP-PVD, изменяется с 1,5 до 2,5 Вт/(м·К) и относительно независима от температуры [12, 13, 22]. Благодаря пористой структуре керамического покрытия (рис. 1) уровень теплопроводности незначительно зависит от температуры и определяется соотношением кондуктивной теплопроводности и сильным рассеиванием фононов при колебаниях достаточно стабильной решетки тетрагональной t' -фазы, а также большим количеством дефектов в виде пор и точечных дефектов и переносом теплоты излучением и конвекцией в порах. С ростом температуры кондуктивная составляющая теплопроводности твердой фазы уменьшается, а составляющие общей теплопроводности – за счет излучения и конвекции – увеличиваются. При этом следует иметь в виду, что наличие крупных межстолбчатых пор приводит к повышению общей теплопроводности (особенно при высоких температурах) именно за счет излучения и конвекции, в то время как мелкие поры являются хорошим препятствием для переноса тепла.

Наиболее широко используемым способом определения теплопроводности является метод лазерной вспышки [12, 15, 23, 24]. Этот метод для определения теплопроводности КС ТЗП применяют с использованием как оптического, так и контактного термодатчика температуры для измерения подъема температуры на задней поверхности образца после нагрева передней поверхности импульсом лазерного излучения [23, 25]. Способ определения теплопроводности по методу лазерной вспышки [12, 13, 26–28] материала КС на двухслойном образце (керамический слой+металлическая подложка) предпочтителен, так как не требует нанесения толстых слоев и особой осторожности при обращении с образцами в процессе нанесения и после их отделения от подложки ввиду их пористости. Вместе с тем необходимость снижения массы изделия требует нанесения тонких керамических слоев толщиной 40–60 мкм.

Теплопроводность определяется по результатам измерения температуропроводности a , удельной теплоемкости c_p и плотности ρ из термодинамического соотношения

$$\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho. \quad (1)$$

В соответствии с требованиями измерения температуропроводности по методу лазерной вспышки поглощение импульса лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм должно происходить на поверхности образца [23, 25].

При взаимодействии излучения с поверхностью среды оно частично отражается, а частично проникает внутрь материала, поглощается в нем и, как правило, достаточно быстро переходит в тепло. В этом случае изменение плотности светового потока по глубине описывается законом Бугера:

$$q(z) = A \cdot q_0 e^{-\alpha z}, \quad (2)$$

где q_0 – плотность падающего светового потока на поверхность материала; $A=1-R$ – поглощательная способность материала (R – отражательная способность материала); α – линейный коэффициент поглощения; координата z отсчитывается от поверхности по толщине материала.

В диэлектриках поглощение излучения определяется в основном связанными носителями и коэффициент поглощения α достигает значений 10^3 – 10^4 см⁻¹, в отличие от металлов, имеющих $\alpha \approx 10^5$ – 10^6 см⁻¹. При этом глубина поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм достигает более 10 мкм, т. е. оксидный слой керамического покрытия является полупрозрачным для лазерного излучения. Вместе с тем тепловое излучение с керамического покрытия, воспринимаемое ИК-датчиком температуры при его использовании для измерения подъема температуры на задней поверхности образца, будет происходить из глубины покрытия и таким образом не будет удовлетворять требованиям измерения температуропроводности по методу лазерной вспышки [23, 25]. Поэтому на поверхность керамического ТЗП двухслойного образца (керамический слой+металлическая подложка) необходимо наносить металлическое покрытие. Обычно используют покрытие золотом [12, 25, 26], наносимое вакуумным катодным напылением, поверх которого наносится (как правило, с помощью распыления) диспергированный графит в виде аэрозоля – для сохранения высокой и стабильной степени черноты поверхности, улучшения теплообмена и создания идентичных условий при измерении теплоемкости способом сравнения с образцом с известной теплоемкостью [25, 29].

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных направлений 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» и 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Образцы КС покрытия на основе YSZ для исследования теплопроводности наносили на подложку $\varnothing 10$ мм и толщиной 1,50 мм из сплава нихром ЭИ435 по технологии реактивного магнетронного распыления. Толщина КС при этом

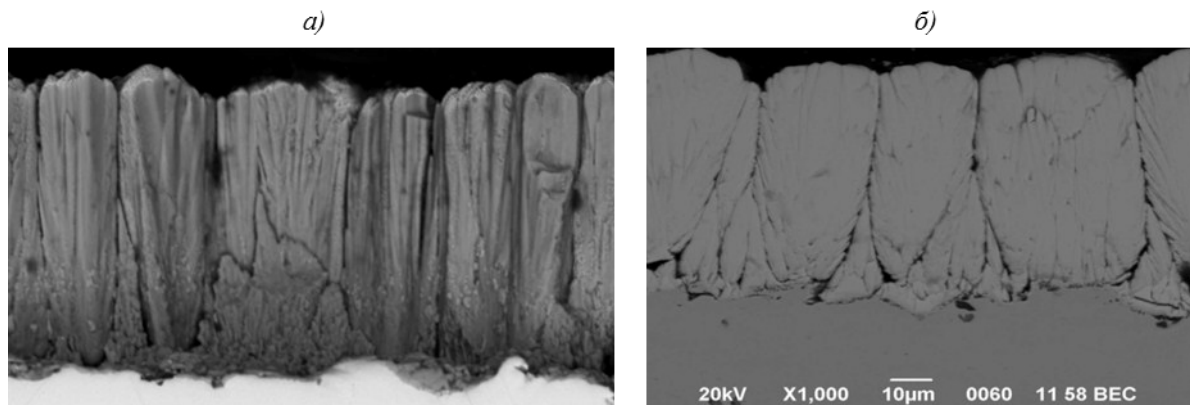


Рис. 5. Микроструктура SEM керамических слоев на основе $ZrO_2-8Y_2O_3-Hf-O$ (а) и $ZrO_2-11Y_2O_3-Gd_2O_3$ (б), нанесенных по магнетронной технологии

изменялась с 45 до 60 мкм. Микроструктура полученных КС ТЗП (рис. 5) характеризуется следующими особенностями:

- столбчатые зерна YSZ (диаметр 10–30 мкм) выращены из области равноосного зерна к поверхности покрытия;
- тонкие области поликристаллического YSZ с равноосными зернами (от 0,5 до 1 мкм) находятся около поверхности раздела металл/керамика;
- вертикальные каналы расположены между столбчатыми зернами;
- присутствует мелкая пористость в пределах столбчатых зерен.

На поверхность керамического ТЗП двухслойного образца (керамический слой+металлическая подложка), для исключения влияния прозрачности КС, с помощью катодного напыления наносили покрытие из золота. Использовали также вариант покрытия пастой с наполнителем из серебряной пудры. После высыхания на воздухе и термообработки серебряного покрытия с постепенным увеличением температуры до $700^\circ C$ на поверхности КС формируется тонкий слой серебра толщиной от 5 до 10 мкм. С целью обеспечения высокой поглощательной способности на поверхность металлического покрытия распылением наносится диспергированный графит в виде аэрозоля (рис. 6).

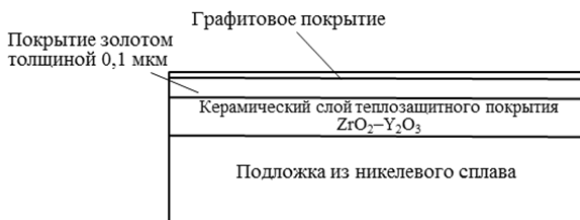


Рис. 6. Схема двухслойного образца для определения теплопроводности керамического слоя YSZ

Импульсный метод лазерной вспышки измерения температуропроводности и определения теплопроводности (1) основан на тепловом поведении адиабатически изолированной (теплоизолированной) пластины материала, первоначально

имеющей постоянную температуру, одна сторона которой подвергается воздействию короткого импульса тепловой энергии в виде излучения [22].

Из решения уравнения теплопроводности – распределения температуры в термически изолированной твердой пластине равномерной толщины L – получено математическое выражение, из которого рассчитывается температуропроводность:

$$a = \frac{1,38 \cdot L^2}{\pi^2 \cdot \tau_{1/2}}, \quad (3)$$

где $\tau_{1/2}$ – время достижения температуры на задней поверхности образца, равной половине своего максимального значения (рис. 7).

На практике небольшой образец в виде диска подвергается облучению коротким по времени импульсом лучистой энергии. Энергия импульса поглощается в тонком слое передней поверхности образца и равномерным тепловым потоком распространяется по толщине образца. Результат повышения температуры во времени на задней поверхности образца регистрируется (рис. 7). Точность результатов измерений зависит от соответствия между математической и экспериментальной моделями.



Рис. 7. Кривая изменения температуры на задней поверхности двухслойного образца «керамический слой YSZ+подложка из нихрома ЭИ435», измеренная оптическим датчиком после облучения лазерной вспышкой при температуре $994^\circ C$

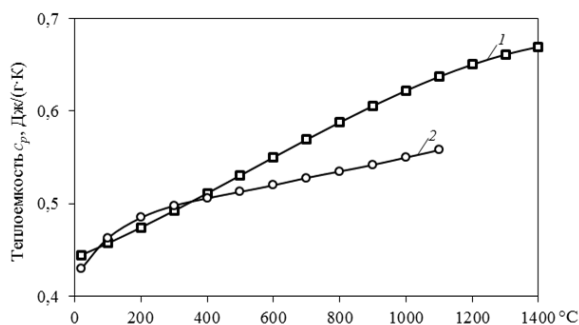


Рис. 8. Результаты измерения теплоемкости керамического слоя на основе $ZrO_2-Y_2O_3-Gd_2O_3$ (1) и сплава ЭИ435 (2)

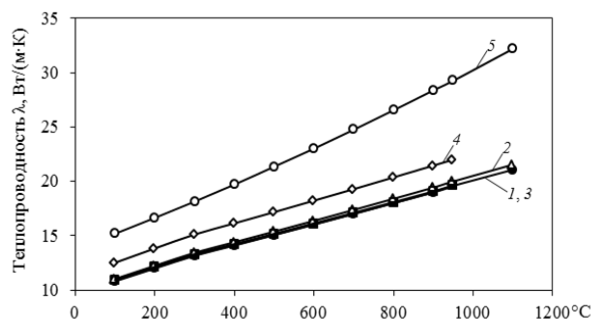


Рис. 9. Теплопроводность подложки из сплава ЭИ435 (5) и эффективная теплопроводность двухслойных образцов с подложкой из сплава ЭИ435 и керамического слоя теплозащитного покрытия на основе:

1 – Zr-7,8Y-Gd-Al с покрытием Au; 2, 3 – Zr-11Y-Gd с покрытиями Au и Ag соответственно; 4 – Zr-10Y-10Gd с покрытием Ag

Измерения температуропроводности выполняли на приборе LFA 427 (фирма Netzsh, Германия) при нагреве в диапазоне температур от 20 до 1200°C в среде потока аргона с расходом 70 мл/мин.

Теплоемкость материалов КС ТЗП и подложки для расчета теплопроводности измеряли на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 404F1 (фирма Netzsh, Германия) при нагреве со скоростью 20 К/мин в диапазоне температур от 20 до 1200°C в среде потока аргона с расходом 100 мл/мин.

Результаты

Измеренная температуропроводность двухслойного образца, состоящего из «керамического слоя YSZ+подложка из нихрома ЭИ435», характеризует тепловое сопротивление двух слоев материала образца: керамического слоя известного состава $ZrO_2-Y_2O_3-Gd_2O_3(Gd_2Zr_2O_7)$ и подложки из сплава ЭИ435. Предполагается, что на границе контакта слоев существует идеальная адгезия: равны температуры и тепловые потоки по обе стороны границы и тепловое сопротивление контакта можно не принимать во внимание. Термическое сопротивление двухслойного образца равно

$$\frac{L}{\lambda_{эф}} = \frac{L_{КС}}{\lambda_{КС}} + \frac{L_{подл}}{\lambda_{подл}}, \quad (4)$$

где L – суммарная толщина КС покрытия и подложки; $L_{КС}$ – толщина КС покрытия; $L_{подл}$ – толщина подложки; $\lambda_{эф} = a \cdot c_p \cdot \rho$ – эффективная теплопроводность двухслойного образца; $\lambda_{КС}$ – теплопроводность КС покрытия; $\lambda_{подл}$ – теплопроводность подложки.

Эффективная теплопроводность определяется из произведения измеренной величины температуропроводности двухслойного образца на плотность и на эффективную теплоемкость образца, равную сумме теплоемкостей КС покрытия и подложки, умноженных на их массовые доли:

$$c_{pэф} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \cdot c_{p1} + \frac{M_2}{M_1 + M_2} \cdot c_{p2}. \quad (5)$$

Поскольку масса подложки более чем в 100 раз больше массы КС, то при расчете эффективной теплопроводности двухслойного образца достаточно использовать данные теплоемкости сплава ЭИ435. Кроме того, из результатов измерения теплоемкости КС и сплава ЭИ435 следует (рис. 8) – значения величины их теплоемкости близки, что практически не влияет на замену эффективной теплоемкости двухслойного образца на теплоемкость сплава ЭИ435.

Теплопроводность сплава ЭИ435 и эффективную теплопроводность двухслойных образцов из сплава ЭИ435 с керамическим слоем ТЗП на основе Zr-11Y-Gd, Zr-10Y-10Gd и с ТЗП на основе Zr-7,8Y-Gd-Al с применением покрытий из золота или серебра определили по выражению (1) с использованием данных измерения температуропроводности, теплоемкости и плотности (рис. 9). Исходя из полученных результатов эффективной теплопроводности, по выражению (5) рассчитали теплопроводность КС покрытий (рис. 10, см. таблицу).

Обсуждение и заключения

Из результатов определения теплопроводности покрытий (см. таблицу), нанесенных по магнетронной технологии на подложку из сплава ЭИ435, следует, что увеличение содержания оксида иттрия с 7,8 до 11% (по массе) снижает теплопроводность КС YSZ на 25%, что совпадает с полученными ранее данными [12, 13, 17] о снижении теплопроводности покрытий YSZ с увеличением содержания Y_2O_3 , нанесенных по электронно-лучевой технологии. Вместе с тем значения теплопроводности, полученные с использованием серебряного покрытия на керамическом слое ТЗП, близки к значениям теплопроводности КС

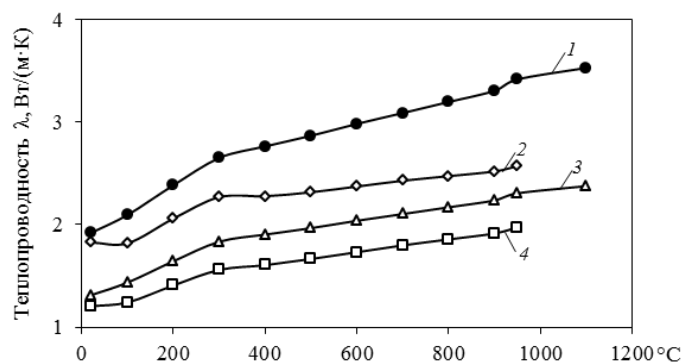


Рис. 10. Результаты определения теплопроводности керамических слоев теплозащитного покрытия на основе: 1 – Zr-7,8Y-Gd-Al с покрытием Au; 2 – Zr-10Y-10Gd с покрытием Ag; 3, 4 – Zr-11Y-Gd с покрытиями Au и Ag соответственно

Теплопроводность керамических слоев теплозащитных покрытий (ТЗП), полученных по магнетронной технологии

Состав керамического слоя ТЗП, % (по массе)	Теплопроводность λ, Вт/(м·К), при температуре, °С					
	20	200	600	800	950	1050
Zr-7,8Y-Gd-Al с покрытием Au	1,9	2,4	3,0	3,2	3,4	3,5
Zr-11Y-Gd с покрытием Au	1,3	1,6	2,0	2,2	2,3	2,4
Zr-11Y-Gd с покрытием Ag	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	–
Zr-10Y-10Gd с покрытием Ag	1,8	2,1	2,4	2,5	2,6	–

ТЗП с использованием покрытия из золота. Это указывает на хорошую воспроизводимость результатов при определении теплопроводности КС ТЗП независимо от вида и способа нанесения

металлического покрытия, необходимого для измерения полупрозрачных материалов, а также на предпочтение использования менее трудоемкой подготовки образца к испытанию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 60–70.
3. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем пониженной теплопроводности на основе оксида циркония для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Современные достижения в области создания перспективных неметаллических композиционных материалов и покрытий для авиационной и космической техники: сб. докл. конф. М.: ВИАМ, 2015. Ч. 1. Доклад №3. URL: <http://conf.viam.ru/conf/172/proceedings> (дата обращения: 27.10.2017).*
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Металлы*. 2012. №1. С. 5–13.
5. Levi C.G. Emerging materials and processes for thermal barrier systems // *Solid state and materials science*. 2004. Vol. 38. P. 77–91.
6. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 3–8.
7. Чубаров Д.А., Будиновский С.А. Выбор керамического материала для теплозащитных покрытий лопаток авиационных турбин на рабочие температуры до 1400°С // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №4. Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-4-7-7.
8. Zhao H., Yu F., Bennett T.D., Wadley H.N.G. Morphology and thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia coatings // *Acta materialia*. 2006. Vol. 54. P. 5195–5207.
9. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Космин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутениевого сплава марки ВЖМ4 // *Труды ВИАМ: электрон.*

- науч.-технич. журн. 2014. №1. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-1-1-1.
10. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 43–46.
 11. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. Электронно-лучевая технология нанесения теплозащитных покрытий // *Новые технологические процессы и надежность ГТД*. М.: Изд-во ЦИАМ, 2008. Вып. 7. С. 144–158.
 12. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. Свойства теплозащитных покрытий, наносимых электронно-лучевой технологией // *Новые технологические процессы и надежность ГТД*. М.: Изд-во ЦИАМ, 2008. Вып. 7. С. 125–144.
 13. Яковчук К.Ю. Теплопроводность и термоциклическая долговечность конденсационных термобарьерных покрытий // *Современная электрометаллургия*. 2014. №4. С. 25–31.
 14. Renteria F.A., Saruhan B., Schulz U. et al. Effect of morphology on thermal conductivity of EB-PVD PYSZ TBCs // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. P. 2611–2620.
 15. Altun O., Boke Y.E. Effect of the microstructure of EB-PVD thermal barrier coatings on the thermal conductivity and the methods to reduce the thermal conductivity // *Archives of materials science and engineering*. 2009. Vol. 40. No. 1. P. 47–52.
 16. Levi C.G., Hutchinson J.W., Vidal-Setif M.H., Johnson C.A. Environmental degradation of thermal barrier coatings by molten deposits // *MRS Bulletin*. 2012. Vol. 37. No. 10. P. 932–941.
 17. Xinghua Zhong, Huayu Zhao, Xiaming Zhou et al. Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate YSZ double-layered thermal barrier coating // *Journal of alloy and compounds*. 2014. Vol. 593. P. 50–55.
 18. Девойно О.Г., Оковитый В.В. Плазменные теплозащитные покрытия на основе диоксида циркония с повышенной термостойкостью // *Наука и техника*. 2015. №1. С. 35–39.
 19. Бычков Н.Г., Климов Д.А., Мыктыбеков Б., Низовцев В.Е. Оценка оптимальной толщины теплозащитных покрытий столбчатой структуры на рабочих лопатках турбин с учетом действия центробежных нагрузок // *Труды МАИ: электрон. журн.* 2011. №46. Ст. 16. URL: <http://trudymai.ru> (дата обращения: 25.10.2017).
 20. Попов П.А., Соломенник В.Д., Ломонова Е.Е., Борик М.А., Мызина В.А. Теплопроводность монокристаллических твердых растворов $ZrO_2\text{--}Y_2O_3$ в интервале температур 50–300 К // *Физика твердого тела*. 2012. Т. 54. №3. С. 615–618.
 21. Ratzer-Scheibe H.-J., Schulz U., Krell T. The effect of coating thickness on the thermal conductivity of EB-PVD PYSZ thermal barrier coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 200. P. 5636–5644.
 22. Nicholls R., Lawson K.J., Johnston A., Rickerby D.S. Low Thermal Conductivity EB-PVD Thermal Barrier Coatings // *High Temperature Corrosion*. Trans Tech Publication. 2001. P. 595–606.
 23. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbott G.L. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity and Thermal Conductivity // *Journal of Applied Physics*. 1961. Vol. 32. P. 1679–1684.
 24. Hemberger F., Gobel A., Ebert H.P. Determination of the thermal diffusivity of electrically non-conductive solids in the temperature range from 80 K to 300 R by laser flash measurement // *International Journal Thermophysical*. 2010. Vol. 31. P. 2187–2200.
 25. ASTM E1461. Standard test method for thermal diffusivity by the flash method. ASTM Standards, American Society for Testing and Materials-Philadelphia, 2002.
 26. Altun O., Erhan Boke Y., Kalemantas A. Problems for determining the thermal conductivity of TBCs by laser-flash method // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2008. Vol. 30. No. 2. P. 115–120.
 27. Hohenauer W., Vozár L. An Estimation of thermophysical properties of layered materials by the laser-flash method // *High Temperature–High Pressures*. 2001. Vol. 33. P. 17–25.
 28. Mcmasters R.L., Dinwiddie R.B., Haji-Sheikh A. Estimating the thermal conductivity of a film on a known substrate // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2007. Vol. 21. No. 4. P. 681–687.
 29. Лощинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Пахомкин С.И. Измерение теплоемкости образцов с покрытием методом лазерной вспышки // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2015. Т. 81. №9. С. 40–44.