

УДК 621.793.71

Ю.В. Лошчинин<sup>1</sup>, М.Г. Размахов<sup>1</sup>, С.И. Пахомкин<sup>1</sup>, А.Н. Луценко<sup>1</sup>**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ  
МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ,  
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ,  
НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-95-103

На основании результатов измерения температуропроводности методом лазерной вспышки в диапазоне температур от 20 до 1100°C многослойных теплозащитных покрытий, полученных газотермическим напылением, установлено существенное увеличение (от 40 до 50%) эффективности теплозащитных свойств покрытий, имеющих два керамических слоя: один –  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ , другой –  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ +оксиды РЗМ, по сравнению с теплозащитными покрытиями, имеющими один керамический слой –  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ . Такой же эффект наблюдается на покрытиях, имеющих один керамический слой  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$  большей толщины, легированный оксидами иттербия и гадолиния. Определена теплопроводность керамического слоя  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ , изготовленного по технологии воздушно-плазменного напыления, равная 1,5 Вт/(м·К), и по технологии магнетронного нанесения, равная 2,4 Вт/(м·К).

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

Yu. V. Loshchinin<sup>1</sup>, M. G. Razmakhov<sup>1</sup>, S. I. Pakhomkin<sup>1</sup>, A. N. Lutsenko<sup>1</sup>**INFLUENCE OF STRUCTURE AND TECHNOLOGY OF DRAWING  
OF MULTILAYER HEAT-PROTECTIVE COATINGS  
PRODUCED BY THERMAL SPRAYING DUSTING  
ON THERMAL CONDUCTIVITY**

On the basis of results of measurement of thermal diffusivity the method of laser flash with the temperature range from 20 to 1100°C multilayer heat-protective coatings received by thermal spraying dusting has establishes essential increase (from 40 to 50%) efficiency of heat-protective properties of coverings of having two ceramic layers: one –  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ , of other –  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ +oxides REM in comparison with the heat-protective coverings having one ceramic layer of –  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ . The same effect is observed on the coverings having one ceramic layer of  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$  of bigger thickness, alloyed by ytterbium and gadolinium oxides. Thermal conductivity of ceramic layer of  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$  made on technologies of atmospheric plasma spraying, equal 1,5 W/(m·K) and is determined by technology of the magnetron drawing, equal 2,4 W/(m·K).

**Keywords:** heat-protective covering, cathode-ray and magnetron drawing, thermocyclic durability, thermal diffusivity, thermal conductivity, heat capacity, method of laser flash, thermal resistance.

<sup>1</sup>Федеральное 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

Известно, что повышение тяговооруженности газотурбинного двигателя (ГТД) достигается, прежде всего, за счет увеличения температуры газа при сгорании топлива. Большая часть этого прироста обеспечивается благодаря применению более жаропрочных материалов, совершенствованию системы воздушного охлаждения деталей горячего тракта ГТД и применению высокоэффективных многослойных жаростойких и теплозащитных покрытий (ТЗП) на лопатках турбины. Использование различных технологий нанесения ТЗП и состава защитных слоев на детали горячего тракта ГТД вызвано жесткими условиями работы и высокими требованиями при их эксплуатации. Как правило, для защиты от агрессивного эрозионного и высокотемпературного воздействия газовой среды используются многокомпонентные жаростойкие соединительные слои (ЖСС) и внешний теплозащитный керамический слой на основе оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия –  $ZrO_2-Y_2O_3$  (YSZ) [1–6]. Керамический слой теплозащитного покрытия YSZ может быть получен со слоисто-пористой структурой по технологии газотермического напыления: воздушно-плазменного (APS) или вакуумно-плазменного (VPS) и со столбчатой структурой в процессе электронно-лучевого (EP-PVD) или среднечастотного магнетронного напыления [7]. В отличие от более высокой теплопроводности, равной  $\sim(1,5-2,5)$  Вт/(м·К), для керамического слоя YSZ ТЗП [7, 8, 11–13] со столбчатой микроструктурой, имеющей меж- и внутрисклончатую пористость, полученную по технологии EP-PVD или магнетронного нанесения, теплопроводность керамических слоев YSZ, нанесенных воздушно-плазменным напылением APS, составляет 0,8–1,1 Вт/(м·К) [7, 8] и определяется слоистой структурой с высокой пористостью, поперечной тепловому потоку. Однако, имея более низкие эксплуатационные свойства, особенно по количеству теплосмен и др., плазменные (APS) ТЗП широко применяются для защиты деталей горячего тракта ГТД благодаря низкой теплопроводности, универсальности применения, наименьшим затратам при производстве. Снижение активности диффузионных процессов и компенсация разницы в величине теплового расширения защищаемого жаропрочного сплава и керамических слоев ТЗП обеспечиваются нанесением многокомпонентных металлокерамических ЖСС системы Ni–Cr–Al–Y–Hf(Re) (покрытия ВСДП-3, ВСДП-16 и др.) по ионно-плазменной технологии высоких энергий (ВППВЭ) или с использованием технологий газотермического напыления – APS и VPS [3, 6, 9, 10]. В результате эксплуатационных нагревов или дополнительной термообработки между ЖСС и керамическим слоем YSZ образуется термически выращенный оксид (TGO), длительно препятствующий воздействию агрессивной газовой среды продуктов сгорания топлива на защищаемый жаропрочный сплав.

Дополнительное легирование керамики системы  $ZrO_2-Y_2O_3$  оксидами редкоземельных металлов ( $Gd_2O_3$ ,  $Yb_2O_3$ ,  $Nd_2O_3$  и др.) снижает теплопроводность керамических слоев ТЗП, полученных по технологиям APS или электронно-лучевого (EP-PVD) нанесения. Уменьшение теплопроводности керамических слоев ТЗП при этом связывают со снижением фоновой части проводимости теплового потока через сформировавшуюся кристаллическую решетку более дефектной флюоритной структуры  $Gd_2Zr_2O_7$  [12]. Однако при легировании оксидами РЗМ керамического слоя YSZ наблюдается снижение термоциклической долговечности покрытия, в связи с чем используются двухслойные керамические композиции [YSZ+(YSZ+оксид РЗМ)], в которых нижний слой, контактирующий с ЖСС, – традиционный YSZ, а внешний – YSZ+оксид РЗМ [12–15]. Результаты оценки влияния состава и технологии нанесения покрытий на теплопроводность ТЗП явно недостаточно – как для прогнозирования свойств при разработке и конструировании систем высокоэффективных многослойных покрытий, так и для усовершенствования серийных технологий и отработки новых перспективных способов нанесения ТЗП.

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

Цель исследования – изучение влияния технологий ионно-плазменного ВПТВЭ и вакуумно-плазменного (VPS) или воздушно-плазменного (APS) нанесения ЖСС разного состава металлических сплавов, а также изучение влияния толщины и состава керамических слоев ТЗП, нанесенных методом APS, на температуропроводность и теплопроводность ТЗП.

Измерение температуропроводности образцов многослойных покрытий ТЗП на подложке из сплава ВКНА-1В выполнено с использованием метода лазерной вспышки на приборе LFA 427 (фирма Netzsh, Германия) в диапазоне температур от 20 до 1100°C, в динамической среде аргона с расходом 70 мл/мин [16]. Методика определения теплопроводности методом лазерной вспышки образца, включающего многослойное покрытие, состоящее из слоев ЖСС и одного или двух керамических слоев, нанесенных на металлическую подложку с известной теплопроводностью, предпочтительна [8, 11, 12], так как, в отличие от образца изолированного слоя, не требует нанесения толстых слоев и особой осторожности обращения с образцами в процессе и после их отделения от подложки ввиду их пористости и хрупкости. Оценку эффективности влияния технологии и технологических факторов, состава и структуры на теплопроводность многослойных ТЗП в случае использования подложки одинаковой толщины одного сплава целесообразно проводить по величине температуропроводности всей многослойной конструкции: ЖСС+керамический слой+подложка. При этом не требуется определение плотности и теплоемкости отдельных слоев образца многослойной конструкции, включая материал подложки.

В качестве подложки использованы образцы диаметром 10 мм и толщиной 2 мм из никелевого интерметаллидного сплава ВКНА-1В. На образцы подложки сначала методами ВПТВЭ, APS или VPS наносили 2–3 слоя ЖСС из сплава системы Ni–Cr–Al–Y (покрытия ВСДП-3, ВСДП-3п, СДП-1, ВСДП-16 и др.). Затем методом APS наносили один или два керамических слоя  $ZrO_2+7\%$  (по массе)  $Y_2O_3$  (далее:  $7\%Y_2O_3$ ) или керамические слои  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ , дополнительно легированные оксидами РЗМ (см. таблицу). Суммарная толщина покрытия для образцов разных составов изменялась от 160 до 600 мкм. При изготовлении образца 6 нанесение керамического покрытия по технологии APS осуществляли с использованием плазмотрона Metco 205 NS.

**Состав и технология нанесения многослойных теплозащитных покрытий на подложку из сплава ВКНА-1В**

Условный номер образца	Состав и технология нанесения покрытия
1	[ВСДП-3+ВСДП16] (ВПТВЭ)+ВСДП-3п (APS)+[ $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ ] (APS)
2	СДП-1 (ВПТВЭ)+ПНХ20К20Ю13 (APS)+[ $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ ] (APS)
3	ВСДП-3п (VPS)+ПВ-Н70Ю30 (VPS)+[ $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ ] (APS)+ [ $ZrO_2+7\%Y_2O_3+Yb_2O_3+Gd_2O_3$ ] (APS)
4	ВСДП-3п (VPS)+ПВ-Н70Ю30 (APS)+[ $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ ] (APS)+ +[ $ZrO_2+7\%Y_2O_3+Yb_2O_3+Gd_2O_3$ ] (APS)
5	ВСДП-3п (VPS)+ПВ-Н70Ю30 (VPS)+[ $ZrO_2+7\%Y_2O_3+Yb_2O_3+Gd_2O_3$ ] (APS)
6	ВСДП-3п (VPS)+ПВ-Н70Ю30 (VPS)+ +Metco 205 NS [ $ZrO_2+24\%CeO_2+2,5\%Y_2O_3$ ] (APS)

Целью исследования была также оценка теплопроводности керамического слоя ТЗП системы  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ , изготовленного по технологии магнетронного нанесения, в сравнении с керамическим слоем ТЗП такого же состава, нанесенным по технологии газотермического напыления APS.

Теплопроводность керамического слоя ТЗП системы  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ , полученного по технологии магнетронного нанесения определяли на образце диаметром 10 мм, состоящим из керамического слоя толщиной 50 мкм и подложки толщиной 1,965 мм из жаропрочного никелевого сплава ЖС36. Теплофизические свойства подложки из сплава ЖС36 были изучены ранее [17]. Теплопроводность керамического слоя ТЗП ( $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ ) рассчитывали по двухслойной модели термического сопротивления (1), исходя из данных теплопроводности сплава ЖС36 и измеренных результатов температуропроводности двухслойного образца – керамический слой ТЗП ( $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ )+сплав ЖС36:

$$\frac{L}{\lambda_{эф}} = \frac{L_{кс}}{\lambda_{кс}} + \frac{L_{подл}}{\lambda_{подл}}, \quad (1)$$

где  $L$  – суммарная толщина слоев ТЗП-покрытия и подложки;  $L_{кс}$  и  $L_{подл}$  – толщина керамического слоя покрытия и подложки из сплава ЖС36 соответственно;  $\lambda_{эф}$ ,  $\lambda_{кс}$  и  $\lambda_{подл}$  – эффективная теплопроводность двухслойного образца, теплопроводности керамического слоя покрытия и подложки из сплава ЖС36 соответственно.

Теплопроводность  $\lambda_{эф}$  двухслойного образца рассчитывали по выражению

$$\lambda_{эф} = a \cdot c_p \cdot d, \quad (2)$$

где  $\lambda_{эф}$  – эффективная теплопроводность, Вт/(м·К);  $a$  – температуропроводность двухслойного образца, м<sup>2</sup>/с;  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  $d$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Теплоемкость двухслойного образца является величиной аддитивной и равна сумме теплоемкостей керамического слоя покрытия и подложки, умноженных на их массовые доли. Поскольку масса подложки больше массы керамического слоя более чем в 100 раз, то при расчете эффективной теплопроводности двухслойного образца достаточно использовать данные теплоемкости подложки из сплава ЖС36. Вышеприведенное соображение относится также и к плотности двухслойного образца. Неопределенность такой замены не превышает 1%.

Для исключения частичной прозрачности керамического слоя и для удовлетворения требований метода измерения [16] о поглощении энергии лазерного излучения в тонком слое поверхности, перед измерением температуропроводности многослойных образцов на поверхность керамического слоя, обращенную к лазерному излучению, катодным напылением наносили покрытие из платины толщиной от 1 до 2 мкм. Увеличение поглощательной способности металлизированной поверхности керамического слоя обеспечивали нанесением тонкого зачерняющего графитового покрытия.

### Результаты

Результаты измерения температуропроводности двухслойного образца керамический слой ТЗП ( $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ )+сплав ЖС36, полученного магнетронным способом нанесения керамического слоя на подложку из сплава ЖС36, и данные температуропроводности для сплава ЖС36 [17] приведены на рис. 1. Данные теплопроводности для сплава ЖС36, используемые для расчета теплопроводности керамического слоя ТЗП ( $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ ), представлены в виде температурной зависимости в диапазоне от 20 до 1250°C, описанной полиномом 5-й степени:

$$\lambda = 8,76 + 1,63 \cdot 10^{-2} \cdot t - 4,17 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 1,27 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 1,35 \cdot 10^{-10} \cdot t^4 + 4,72 \cdot 10^{-14} \cdot t^5, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $t$  – температура, °С.

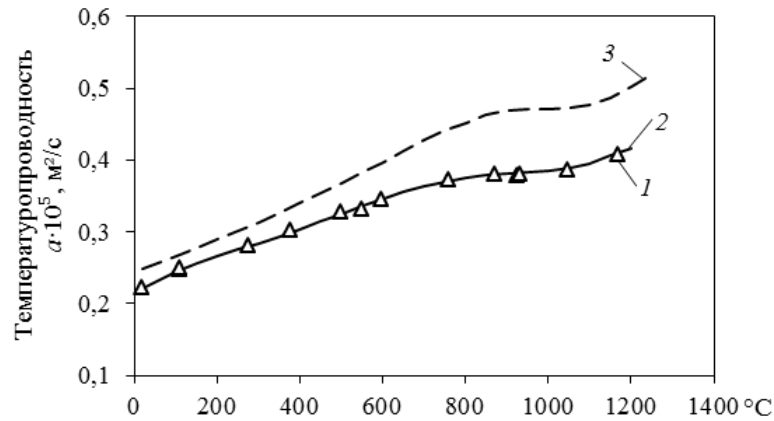


Рис. 1. Температуропроводность двухслойного образца – керамический слой теплозащитного покрытия ( $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ )+сплав ЖСЗ6:

1 – результаты измерения; 2 – аппроксимированные значения; 3 – сплав ЖСЗ6

Исходя из данных по теплопроводности (3), теплоемкости и плотности подложки из сплава ЖСЗ6 [17] и результатов расчета по выражению (2) теплопроводности  $\lambda_{эф}$  двухслойного образца, состоящего из керамического слоя ТЗП ( $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ )+сплав ЖСЗ6, по выражению (1) рассчитали теплопроводность керамического слоя ТЗП –  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$  (рис. 2). Теплопроводность этого слоя, полученного магнетронным способом, в диапазоне температур от 20 до 1100°C путем аппроксимации можно описать следующим уравнением:

$$\lambda = 2,38 - 2,60 \cdot 10^{-4} \cdot t + 2,40 \cdot 10^{-7} \cdot t^2, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $t$  – температура, °С.

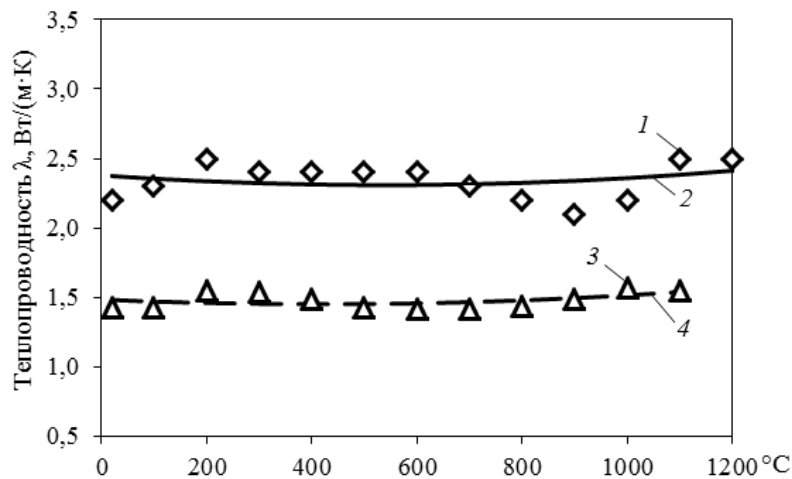


Рис. 2. Теплопроводность керамического слоя теплозащитного покрытия системы  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ , изготовленного магнетронным (1) и воздушно-плазменным нанесением (3); 2 и 4 – результаты аппроксимации

Измерения температуропроводности образцов 1–6 (см. таблицу) многослойных ТЗП на подложке из сплава ВКНА-1В, нанесенных газотермическим напылением, выполнены в диапазоне температур от 20 до 1100°C (рис. 3).

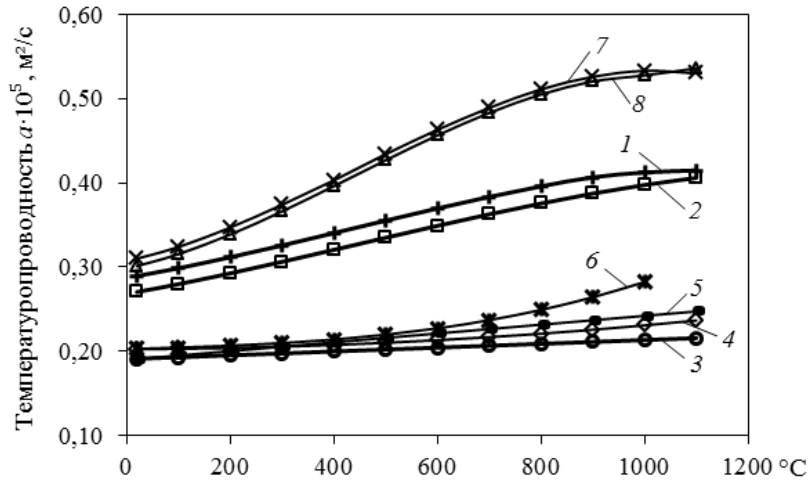


Рис. 3. Температуропроводность многослойных теплозащитных покрытий на подложке из сплава ВКНА-1В, нанесенных газотермическим напылением: образцы 1–6 (см. таблицу); 7 – сплав ВКНА-1В; 8 – данные для сплава ВКНА-1В [17]

На рис. 3 представлены также результаты измерения температуропроводности сплава ВКНА-1В в качестве подложки в сравнении с ранее полученными данными. Немонотонное изменение температуропроводности сплава ВКНА-1В при температурах  $>800^{\circ}\text{C}$  характеризует растворение вторичной дисперсной  $\gamma'$ -фазы.

Используя результаты измерения температуропроводности образца 2 с керамическим слоем  $\text{ZrO}_2+7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ , данные по теплопроводности, теплоемкости и плотности сплава ВКНА-1В, по выражению (1) рассчитали теплопроводность керамического слоя  $\text{ZrO}_2+7\% \text{Y}_2\text{O}_3$  в диапазоне температур от 20 до  $1100^{\circ}\text{C}$ , нанесенного по технологии воздушно-плазменного напыления. Результаты определения (рис. 2) описаны выражением

$$\lambda = 1,48 - 1,59 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1,90 \cdot 10^{-7} \cdot t^2, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

### Обсуждение результатов

Теплопроводность керамического слоя ТЗП ( $\text{ZrO}_2+7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ ), изготовленного по технологии магнетронного нанесения, составляет 2,4 Вт/(м·К), практически не изменяется с ростом температуры и находится в диапазоне известных значений [11–13, 18]. Разработанные технологические способы и режимы нанесения ТЗП по достаточно известной электронно-лучевой технологии и по новой перспективной магнетронной технологии направлены на получение столбчатой структуры керамического теплозащитного слоя, обеспечивающей низкую теплопроводность [2, 19] и высокую термоциклическую долговечность. На теплопроводность керамического слоя, прежде всего, оказывает влияние диаметр столбчатых кристаллитов, наличие межкристаллитной пористости в виде каналов, направленных перпендикулярно к поверхности металлической подложки, а также внутрикристаллическая пористость. Размеры и текстура столбцов существенно зависят от технологических параметров нанесения. Увеличение толщины столбцов с 1,5 до 10–15 мкм приводит к возрастанию теплопроводности [12, 18, 19]. В данном случае столбчатая структура керамического слоя на исследованных образцах недостаточно совершенна, не имеет дендритной структуры с развитой пористостью [20], толщина столбцов достигает 20 мкм (рис. 4), что и приводит к завышенной величине теплопроводности.

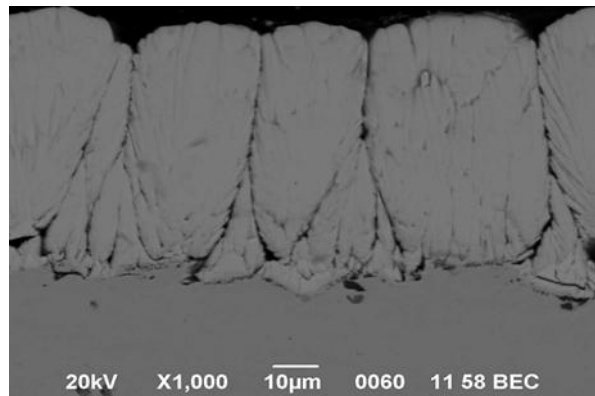


Рис. 4. Структура керамического слоя системы  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ , полученного по технологии магнетронного нанесения [5]

Для сравнения далее представлено схематическое изображение структуры керамического слоя покрытия, нанесенного газотермическим напылением по APS- или VPS-технологиям (рис. 5).

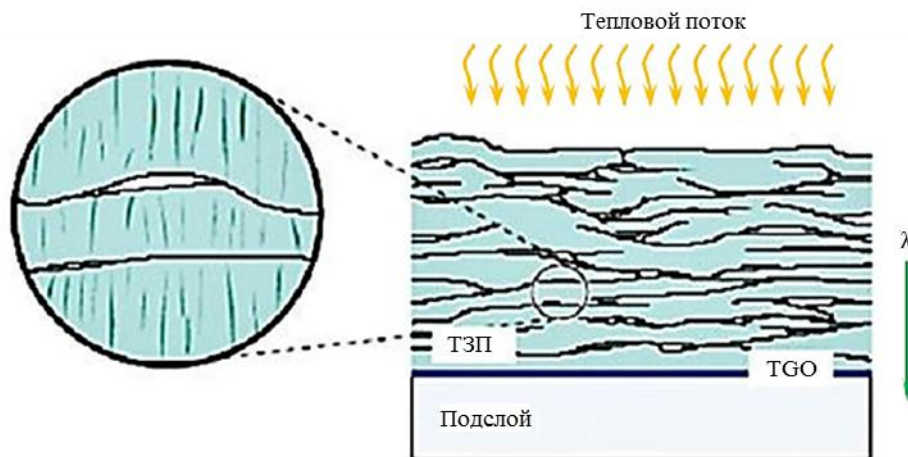


Рис. 5. Схематическое изображение структуры керамического слоя покрытия, нанесенного по новой воздушно-плазменной технологии [7]. Показана морфология пор, расположенных перпендикулярно направлению теплового потока (TGO – термически выращенный оксидный слой)

Из результатов измерения температуропроводности образцов с многослойными ТЗП на подложке из сплава ВКНА-1В, изготовленными газотермическим напылением по технологиям APS и VPS (рис. 3), следует, что нанесение двухслойной композиции керамического слоя YSZ+(YSZ+оксид РЗМ), направленное на повышение термоциклической долговечности и уменьшение теплопроводности, приводит к существенному увеличению (с 40 до 50%) эффективности теплозащитных свойств покрытий образцов 3 и 4 (см. таблицу), по сравнению с покрытиями образцов 1 и 2. Такой же эффект наблюдается на образцах 5 и 6, имеющих один керамический слой  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$ , легированный оксидами иттербия и гадолиния. Полученные результаты подтверждают имеющиеся данные [12, 14, 15] о значительном уменьшении теплопроводности керамических слоев YSZ ТЗП, легированных оксидами  $Yb_2O_3$  и  $Gd_2O_3$ .

Теплопроводность ЖСС из сплавов системы Ni–Cr–Al–Y (покрытия ВСДП-3, ВСДП-3п, СДП-1, ВСДП-16 и др.) находится на уровне теплопроводности жаропрочных никель-хромовых и интерметаллидных никелевых сплавов и изменяется в среднем от 8 до 20 Вт/(м·К) в диапазоне температур от 20 до 1100°C. В связи с этим термическое

сопротивление ЖСС не выделяли для отдельного слоя, а принимали толщину подложки и ЖСС за общую толщину подложки по отношению к толщине керамического слоя. При оценке результатов измерения температуропроводности образцов с многослойными покрытиями ТЗП на подложке из сплава ВКНА-1В влияние термического сопротивления ЖСС не выявлено. Возможно, для этого требуется проведение дополнительных исследований, что не входило в задачу проведенных исследований.

### Заключения

Исходя из полученных результатов, показана высокая эффективность методики определения теплопроводности керамического теплозащитного слоя ТЗП по измерению температуропроводности образцов состоящих из двух и более слоев испытываемых материалов для керамических слоев ТЗП, нанесенных на металлическую подложку с известными теплофизическими свойствами. Результаты определения теплопроводности керамического слоя ТЗП со столбчатой структурой, полученной по магнетронной технологии (2,4 Вт/(м·К)), и слоисто-пористой структурой, изготовленной по плазменной APS-или VPS-технологии (1,5 Вт/(м·К)), совпадают с известными данными и могут затем использоваться при отработке технологических режимов и параметров нанесения ТЗП. Методика оценки теплозащитных свойств и эффективности керамических слоев многослойных ТЗП по величине температуропроводности всей многослойной конструкции (ЖСС+керамический слой+подложка) при варьировании способов нанесения и состава в случае использования подложки одинаковой толщины из одного и того же сплава может быть признана успешной. Установлено существенное увеличение (от 40 до 50%) эффективности теплозащитных свойств покрытий образцов 3 и 4 (см. таблицу), имеющих два керамических слоя: один –  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ , другой –  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ +оксиды РЗМ, по сравнению с покрытиями образцов 1 и 2, имеющими один керамический слой  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ . Подобный эффект наблюдается на образцах 5 и 6, имеющих один керамический слой  $ZrO_2+7\% Y_2O_3$ , легированный оксидами иттербия и гадолиния.

### 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. 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: 25.03.2019).
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
4. Чубаров Д.А., Будиновский С.А. Выбор керамического материала для теплозащитных покрытий лопаток авиационных турбин на рабочие температуры до 1400°C // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-4-7-7.
5. Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А. Разработка теплозащитных покрытий для рабочих и сопловых лопаток турбины из жаропрочных и интерметаллидных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 05 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577-2307-6046-2015-0-4-5-5.

6. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Чубаров Д.А. Технология получения ионно-плазменных жаростойких подслоев с повышенным содержанием алюминия для перспективных ТЗП // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 56–60. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-56-60.
7. Будиновский С.А., Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-38-44.
8. 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.
9. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Космин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутенийсодержащего сплава марки ВЖМ4 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №1. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 26.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-1-1-1.
10. Матвеев П.В., Будиновский С.А. Исследование свойств защитных жаростойких покрытий для интерметаллидных никелевых сплавов типа ВКНА для рабочих температур до 1300°C // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 22–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-22-26.
11. Попов П.А., Соломенник В.Д., Ломонова Е.Е. и др. Теплопроводность монокристаллических твердых растворов  $ZrO_2-Y_2O_3$  в интервале температур 50–300 К // *Физика твердого тела*. 2012. Т. 54. Вып. 3. С. 615–618.
12. Яковчук К.Ю. Теплопроводность и термоциклическая долговечность конденсационных термобарьерных покрытий // *Современная электрометаллургия*. 2014. №4. С. 25–31.
13. Лощинин Ю.В., Будиновский С.А., Размахов М.Г. Теплопроводность теплозащитных легированных оксидами РЗМ покрытий  $ZrO_2-Y_2O_3$ , полученных магнетронным нанесением // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. №3 (52). С. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
14. Movchan B.A., Yakovchuk K.Yu. Advanced graded protective coatings, deposited by EB-PVD // *Materials Science Forum*. 2007. No. 546–549. P. 1681–1688.
15. Zhong X., Zhao H., Zhou X. et al. Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate / YSZ double-layered thermal barrier coating // *Journal of Alloy and Compounds*. 2014. No. 593. P. 50–55.
16. ASTM E 1461. Standard Test Method for Thermal Diffusivity of Solids by the Flash Method. West Conshohocken: ASTM International, 2001. P. 1–8.
17. Зуев А.В., Лощинин Ю.В., Баринов Д.Я., Мараховский П.С. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 575–595. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595.
18. Slifka A.J., Filla B.J. Thermal conductivity measurement of an electron-beam physical-vapor-deposition coating // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2003. Vol. 108. P. 147–150.
19. Ratzner-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.
20. Jang B.K., Yoshiya M., Yamaguchi N., Matsubara H. Evaluation of thermal conductivity of zirconia coating layers deposited by EB-PVD // *Journal of Materials Science*. 2004. Vol. 39. P. 1823–1825.