

Обзорная статья

УДК 621.793

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29409>



*А.Ф. Медников, К.С. Медведев, Г.В. Качалин,
А.Б. Тхабисимов [✉], Е.В. Качалина*

Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Москва, Россия

[✉] abt-bkt@mail.ru

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. В работе рассмотрены современные способы формирования термобарьерных покрытий, предназначенных для продления срока эксплуатации элементов газотурбинных установок и двигателей, подверженных воздействию продуктов сгорания. Отмечены характеристики, преимущества и недостатки атмосферного плазменного напыления (APS), электронно-лучевого физического осаждения из паровой фазы (ЕВ-РVD), суспензионного плазменного напыления (SPS) и плазменного напыления с введением раствора прекурсора (SPPS), химического осаждения из паровой фазы (CVD), магнетронного распыления (MS-PVD). Рассмотрены характеристики, преимущества и недостатки используемых и перспективных составов термобарьерных покрытий, разрабатываемых для применения при рабочих температурах газа выше 1 300 °С. Показано, что на сегодняшний день развитие термобарьерных покрытий возможно за счет усовершенствования технологических процессов их формирования и разработки новых составов с видоизмененной многослойной градиентной структурой, состоящих из оксидов редкоземельных металлов.

Ключевые слова: Газотурбинная установка, высокотемпературная коррозия, жаростойкость, термобарьерные покрытия, способы формирования покрытий, низкая теплопроводность, термоциклирование.

Благодарности: Государственное задание № FSWF-2023-0016 (Соглашение № 075-03-2023-383 от 18 января 2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг.

Для цитирования:

Медников А.Ф., Медведев К.С., Качалин Г.В. и др. Обзор современных способов формирования термобарьерных покрытий // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 132–148. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29409>

Overview article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29409>

A.F. Mednikov, K.S. Medvedev, G.V. Kachalin,
A.B. Tkhabisimov , E.V. Kachalina

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia

 abt-bkt@mail.ru

MODERN METHODS OF FORMING THERMAL BARRIER COATINGS: A REVIEW

Abstract. The present article considers modern methods of forming thermal barrier coatings designed to extend the service life of elements of gas turbine installations and engines exposed to combustion products. The characteristics, advantages and disadvantages of atmospheric plasma spraying (APS), electron beam physical vapor deposition (EB-PVD), suspension plasma spraying (SPS) and solution precursor plasma spraying (SPPS), chemical vapor deposition (CVD), magnetron sputtering (MS-PVD) are noted. The characteristics, advantages and disadvantages of the used and promising compositions of thermal barrier coatings developed for use at operating gas temperatures above 1,300°C are considered. It is shown that today the development of thermal barrier coatings is possible due to the improvement of technological processes of their formation and the development of new compositions with a modified multilayer gradient structure consisting of rare earth metal oxides.

Keywords: Gas turbine installation, high temperature corrosion, heat resistance, thermal barrier coatings, methods of coating formation, low thermal conductivity, thermal cycling.

Acknowledgements: State assignment No. FSWF-2023-0016 (Agreement No. 075-03-2023-383 dated January 18, 2023) in the field of scientific activity for 2023–2025.

Citation:

A.F. Mednikov, K.S. Medvedev, G.V. Kachalin and etc., Modern methods of forming thermal barrier coatings: a review, *Global Energy*, 29 (04) (2023) 132–148, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29409>

Введение. Термобарьерные покрытия (ТБП) представляют собой жаростойкие керамические покрытия, которые наносятся на поверхность наиболее горячих металлических деталей газотурбинных энергетических установок (ГТУ) и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1–3]. Элементами оборудования, которые обычно покрываются ТБП, являются камеры сгорания, жаровые трубы, сопловые и рабочие лопатки первых ступеней турбины, и др.

ТБП толщиной 100–400 мкм предназначены для защиты материалов элементов проточной части от воздействия высоких температур, что позволяет им работать выше температуры плавления жаропрочных сплавов [4]. ТБП защищают элементы от газовой коррозии, термических напряжений, а также обеспечивают значительный температурный градиент на тех элементах, которые постоянно подвергается воздействию высоких температур (до 1 700 °С) [5].

Для изготовления элементов высокотемпературной части используются «суперсплавы» (superalloys) на основе никеля, обладающие температурой плавления от 1230 до 1315 °С [6]. За последние два десятилетия появилось несколько поколений этих сплавов, таких как IN738-LC, CMSX-4 и т. д. [4], применение которых позволило увеличить температуру газов, что привело к повышению эффективности ГТУ и ГТД (см. рис. 1). Однако, применение только этих сплавов ограничено температурой их плавления, а также вынужденным увеличением количества охлаждающего

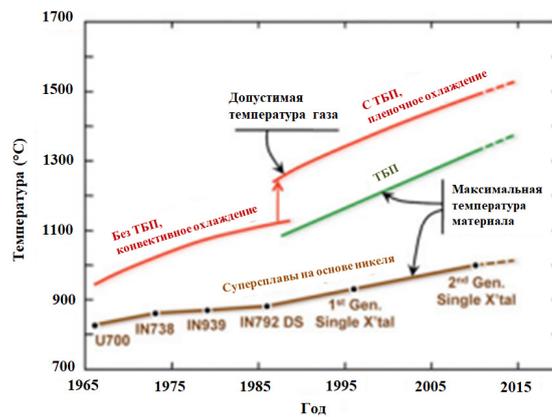
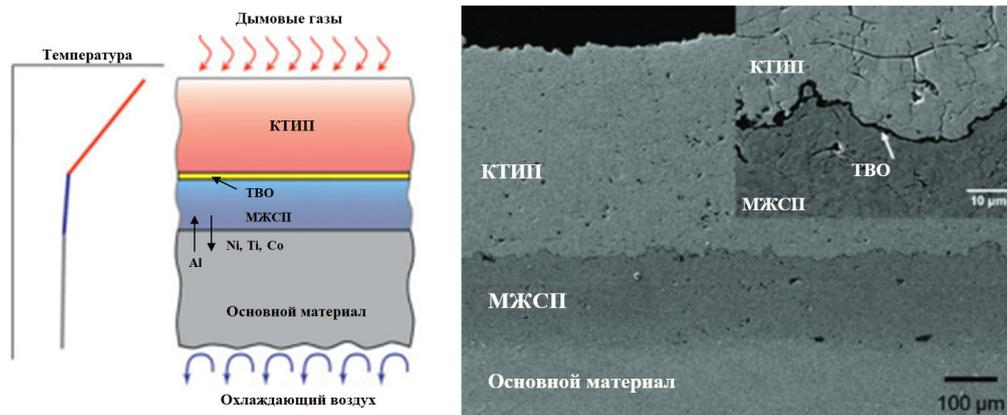


Рис. 1. Прогресс термобарьерных покрытий для газотурбинных двигателей [7]

Fig. 1. Evolution of thermal barrier coatings for gas turbine engines [7]



КТИП – керамическое теплоизоляционное покрытие;
 ТВО – термически выращенный оксид;
 МЖСП – металлическое жаростойкое покрытие

Рис. 2. Структура типичного термобарьерного покрытия [7]

Fig. 2. Structure of a typical thermal barrier coating [7]

воздуха, приводящим к снижению эффективности газотурбинной установки [4]. Вследствие этого необходимо применение ТБП, которое является теплоизолирующим элементом, приводящим к снижению температуры между поверхностью детали и горячими газами на $\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1).

Структура ТБП состоит из трех слоев (см. рис. 2): первый слой – металлическое жаростойкое связующее покрытие (МЖСП) на подложке из конструкционного жаропрочного никелевого сплава, второй слой – термически выращенный оксид (ТВО), который образуется в результате окисления первого слоя из-за воздействия высокой температуры, третий слой – верхнее керамическое теплоизоляционное покрытие (КТИП) [8–10].

МЖСП представляет собой металлический слой, как правило, типа MCrAlY (15–25 мас. % Cr; 10–15 мас. % Al; 0,2–0,5 мас.% Y; где М – матрица γNi или Co) [4], которое защищает от окисления материал подложки (коэффициент теплового расширения МЖСП – $16,8 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ от комнатной температуры до $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$) [4]. МЖСП также предназначено для улучшения адгезии между КТИП и подложкой из никелевого суперсплава [11]. Третий слой – КТИП – является теплоизоляционным слоем с низкой теплопроводностью ($0,8\div 1,2\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) в зависимости от технологии

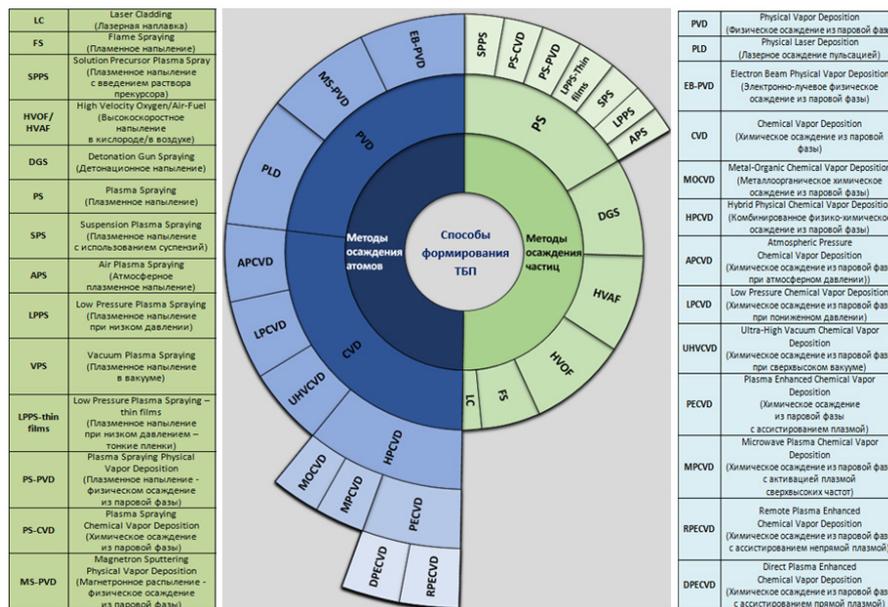


Рис. 3. Способы формирования термобарьерных покрытий [13]

Fig. 3. Methods of forming thermal barrier coatings [13]

формирования ТБП), с высокой стойкостью к термоциклированию и совместимым с материалом подложки коэффициентом термического расширения [8–10].

Современные способы формирования термобарьерных покрытий

Выбор материала ТБП определяется следующими факторами [12]:

- низкая теплопроводность;
- совместимость с тепловым расширением подложки;
- фазовая стабильность;
- устойчивость к окислению;
- химическая инертность к термически выращенному оксидному слою;
- высокая температура плавления;
- стойкость к термоциклированию;
- низкая скорость спекания пористой микроструктуры;
- эрозионная и коррозионная стойкость.

За последние десятилетия было разработано и усовершенствовано большое количество способов формирования ТБП. На рис. 3 показаны современные способы формирования ТБП и их взаимосвязь.

Среди наиболее широко используемых и перспективных способов формирования ТБП можно выделить следующие:

– CVD – Chemical Vapor Deposition (Химическое осаждение из паровой фазы) – химические (газофазные) методы формирования покрытий, которые основаны на химических реакциях, происходящих в газовой фазе или на подложке, формирующие на поверхности подложки требуемое покрытие.

– MS-PVD – Magnetron Sputtering Physical Vapor Deposition (Магнетронное распыление – физическое осаждение из паровой фазы) – разновидность осаждения из паровой фазы в вакууме с использованием магнетронных распылительных систем с мишенями из напыляемых материалов, охлаждаемых или разогретых до высоких температур (выше 0,7 Тпл).

– APS – Atmospheric Plasma Spraying (Атмосферное плазменное напыление) – формирование покрытия из мелких расплавленных частиц, которые переносятся на поверхность при распылении плазмой проволоки, стержней или порошка.

– EB-PVD – Electron Beam Physical Vapor Deposition (Электронно-лучевое физическое осаждение из паровой фазы) – испарение напыляемого материала бомбардировкой его поверхности ускоренным сфокусированным потоком электронов.

– SPPS – Solution Precursor Plasma Spray (Плазменное напыление с введением раствора прекурсора) – плазменная технология нанесения покрытий с использованием прекурсоров, содержащих мелкодисперсные порошки керамик.

– HVOF – High Velocity Oxygen Fuel (Высокоскоростное газопламенное напыление) – один из методов газопламенного нанесения защитного покрытия переносом расплавленного материала в сверхзвуковой кислородной струе.

– PS-PVD – Plasma Spraying Physical Vapor Deposition (Плазменное напыление – физическое осаждение из паровой фазы) – технология плазменного физического осаждения покрытий из паровой фазы, которая является дальнейшим развитием технологии вакуумного плазменного напыления.

В зависимости от приложений и требований для изготовления ТБП используется любой из вышеуказанных способов. Среди них, широко используемыми и хорошо зарекомендовавшими себя методами, являются EB-PVD [14] и APS [15]. Кроме того, в последние годы методы APS были адаптированы на два других способа, а именно суспензионное плазменное напыление (SPS) [16] и плазменное напыление с использованием прекурсоров (SPPS) [17], которые привели к разработке керамических верхних покрытий с низкой теплопроводностью и лучшей устойчивостью к деформации, чем у обычных ТБП, сформированных с использованием APS [15]. Недавно появился гибридный плазменного напыления (PS) [18] и способа физического осаждения из паровой фазы (PVD), известный как PS-PVD [19]. Метод физического осаждения из паровой фазы с использованием «горячих» мишеней магнетронных распылительных систем (MS-PVD) [20], а также различные варианты использования химического осаждения из паровой фазы (CVD) и высокоскоростного напыления в кислороде (HVOF) изучаются для получения современных ТБП [21]. Основные характеристики вышеуказанных способов формирования ТБП приведены в табл. 1. Существенные особенности, преимущества и недостатки методов EB-PVD, APS, SPS, SPPS, CVD, HVOF, MS-PVD и PS-PVD представлены в табл. 2. Разработку новых составов (типов) термобарьерных керамических покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками, а также новых технологических процессов их нанесения проводят ведущие мировые фирмы-производители ГТУ (General Electric, Rolls-Royce, Pratt & Whitney, Siemens, Westinghouse, Mitsubishi и др.), а также значительное число университетов и исследовательских учреждений (центров) разных стран (см. табл. 1).

Используемые и перспективные составы термобарьерных покрытий

Среди широкого спектра керамических материалов в качестве верхнего керамического слоя покрытия наиболее интересен диоксид циркония (ZrO_2) – материал с низкой теплопроводностью, относительно высокой прочностью, износостойкостью, вязкостью разрушения, хорошим коэффициентом термического расширения (см. рис. 4). Недостатком чистого ZrO_2 является то, что его моноклинная структура переходит в тетрагональную и кубическую фазы, когда подвергается воздействию высокой температуры, приводящей к развитию напряжений, что вызывает сколы (трещины) и приводит к разрушению покрытия. Моноклинно-тетрагональный переход в ZrO_2 протекает с разрушительным изменением объема, препятствуя изготовлению и применению изделий из чистого оксида [30]. Для того, чтобы избежать фазового превращения, ZrO_2 частично стабилизируется путем его легирования с различными оксидами, такими как Y_2O_3 , CeO_2 , CaO

Таблица 1

Характеристики способов формирования термобарьерных покрытий [13, 22–29]

Table 1

Characteristics of methods for forming thermal barrier coatings [13, 22–29]

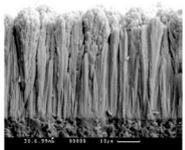
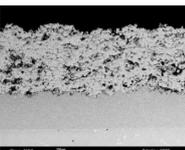
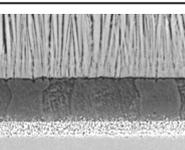
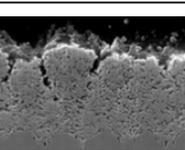
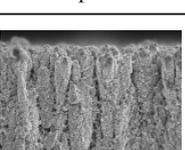
Тип покрытия	Микроструктура	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Термоциклирование	Организации
CVD	 Столбчатая	1,2÷1,7	220÷1200	ООО «ТСЗП» (Россия), Oerlicon (Швейцария), университет г. Брауншвейга (Германия), институт исследования материалов г. Тохоку (Япония), лаборатория Ок-Ридж (США)
MS-PVD	 Столбчатая	1,2÷2	1100÷1200	HEF Duferit USA (США), ООО «ЭПОС-Инжиниринг», НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (все – Россия)
APS	 Изотропная	0,8÷2,3	600÷1100	APS Coating Solutions (Франция), Sulzer (Швейцария), ООО «ТСЗП», ООО «СТГТ» (все – Россия)
EB-PVD	 Столбчатая	1,4÷2,5	300÷2000	United Technologies Corporation, Chromalloy Gas Turbine Corporation (все – США), Mitsubishi Heavy Ind. Ltd (Япония), НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, ГНЦ ФАУ «ЦИАМ» (все – Россия)
SPPS	 Изотропная	0,7÷1,2	1000÷3000	Saint-Gobain ceramics (Франция), Oerlikon Metco (Швейцария)
HVOF	 Изотропная	0,86÷2,09	230	ООО «ТСЗП», ООО «СТГТ», АО «Плакарт», ЦНИИ КМ Прометей, ООО «ИНДМЕТ» (все – Россия)
PS-PVD	 Столбчатая	1,15	> 2000	Sulzer Metco (Швейцария), Titanit (Турция)

Таблица 2

Преимущества и недостатки основных способов формирования ТБП [4]

Table 2

Advantages and disadvantages of the main methods of forming TBCs [4]

Способ	Преимущества	Недостатки
CVD	Большой набор прекурсоров для получения керамики разного состава, широкий диапазон скоростей роста покрытий, возможность управления микроструктурой и составом покрытия, включая градиентное легирование, возможность покрытия крупногабаритных деталей сложной формы, автоматизация процесса.	Сложность процесса осаждения из-за множества взаимодействующих параметров, наличие примесей в покрытии
MS-PVD	Возможность использования различных материалов и соединений, термостойкость, фазовая стабильность, автоматизация процесса, низкая шероховатость, возможность покрытия крупногабаритных деталей	Низкая скорость осаждения, возможность нанесения покрытий только на наружные поверхности деталей, трудоемкость процесса подготовки поверхности.
APS	Регулируемая пористость, стойкость к термоциклированию, возможность использования различных материалов	Сложность процесса осаждения из-за множества взаимодействующих параметров, невозможность покрытия деталей сложной формы
EB-PVD	Длительный срок службы покрытия, высокая скорость осаждения, возможность испарения тугоплавких материалов, металлокерамики и керамики, возможность нанесения многослойных покрытий	Большие капитальные затраты, особые требования к параметрам процесса, возможность неравномерного испарения, ограниченность использования материалов и расширения состава покрытия, возможность нанесения покрытий только на наружные поверхности деталей
SPPS	Высокая устойчивость к деформациям, стойкость к термоциклированию	Сложность технологического процесса, наличие примесей в покрытии, возникновение эффектов спекания и локального перепада
HVOF	Однородность микроструктуры, высокая плотность и хорошая адгезия покрытия, коррозионная стойкость, износостойкость.	Ограниченность материалов и расширения состава покрытия
PS-PVD	Возможность контроля микроструктуры, устойчивость к деформациям, высокая скорость осаждения	Сложность технологического процесса, высокая стоимость и сложность эксплуатации.

или MgO [31, 32]. На сегодняшний день, хорошо зарекомендовавшим себя и используемым в промышленности, является состав покрытия 8YSZ – диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттрия 6–8 мас. % [33].

Дальнейшее повышение эффективности газовых турбин предполагается за счет совершенствования технологии сжигания рабочих газов и охлаждения элементов проточной части в сочетании с более высокими температурами на входе в турбину. Это также подразумевает, что стандартный материал YSZ приближается к определенным ограничениям из-за спекания и фазовых превращений при повышенных температурах [34]. YSZ, образующийся в процессе EB-PVD и APS, состоит из метастабильной t'-фазы. При длительном воздействии повышенных температур он разлагается на фазы с высоким и низким содержанием иттрия. Последняя при охлаждении переходит в моноклинную фазу с соответствующим значительным увеличением объема, что в конечном итоге приводит к разрушению покрытия.

Для применения при рабочих температурах выше 1300 °С материалы ТБП со структурой пирохлора $A_2B_2O_7$ (A – редкоземельный элемент, B – переходный металл) обладают свойствами,

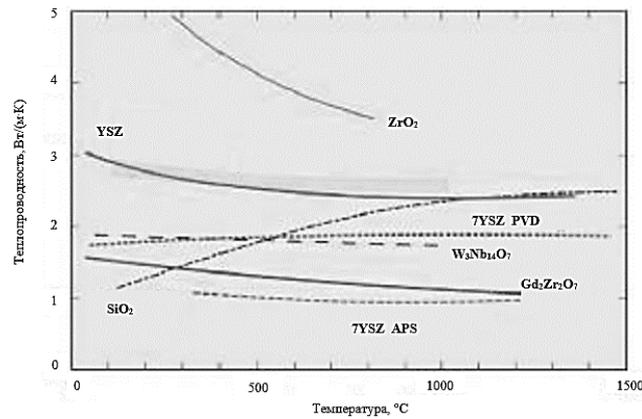


Рис. 4. Влияние температуры на теплопроводность термобарьерных покрытий на основе ZrO_2 [35]

Fig. 4. Effect of temperature on the thermal conductivity of ZrO_2 based thermal barrier coatings [35]

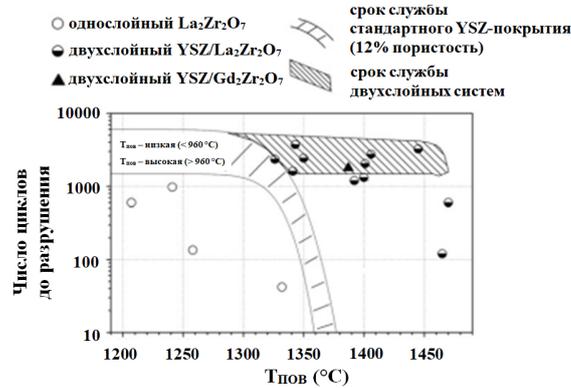


Рис. 5. Результаты термоциклических испытаний в газовой горелке в зависимости от температуры поверхности для различных систем термобарьерных покрытий [6]

Fig. 5. Results of thermal cycle tests in a gas burner depending on the surface temperature for various thermal barrier coating systems [6]

сравнимыми с YSZ. В частности, более низкая теплопроводность некоторых цирконатных пирохлоров делает этот класс материалов перспективным [36]. Среди широко исследованных пирохлоров перспективными материалами для ТБП являются редкоземельные цирконаты ($Ln_2Zr_2O_7$), где Ln – любое значение или комбинация La, Gd, Sm, Nd, Eu и Yb [37-39], а также материалы на основе гафния ($La_2Hf_2O_7$ и $Gd_2Hf_2O_7$) и церия Ce ($La_2Ce_2O_7$ и $La_2(Zr_{0.7}Ce_{0.3})_2O_7$).

Среди пирохлоров, $La_2Zr_2O_7$ (LZ) представляется одним из наиболее перспективных для применения в качестве ТБП, благодаря своим объемным свойствам по сравнению со стандартным YSZ с высокой термостойкостью до 2000 °С, низкой теплопроводностью 1,56 Вт/м К и низкой склонностью к спеканию. Поскольку и подложка, и связующее покрытие имеют относительно более высокие коэффициенты теплового расширения (около $15 \times 10^{-6} K^{-1}$), трещины могут легко расти из-за напряжений, которые накапливаются в ТБП вблизи связующего покрытия во время эксплуатации [37, 38]. Это может быть причиной меньшего срока службы ТБП с $La_2Zr_2O_7$ и $Gd_2Zr_2O_7$ в качестве единственного керамического верхнего покрытия. В так называемой двухслойной системе, с первым слоем YSZ и верхним слоем, изготовленным из пирохлорных материалов, срок службы покрытий, испытываемых в циклических установках с температурным градиентом, значительно увеличивается (см. рис. 5) [6].

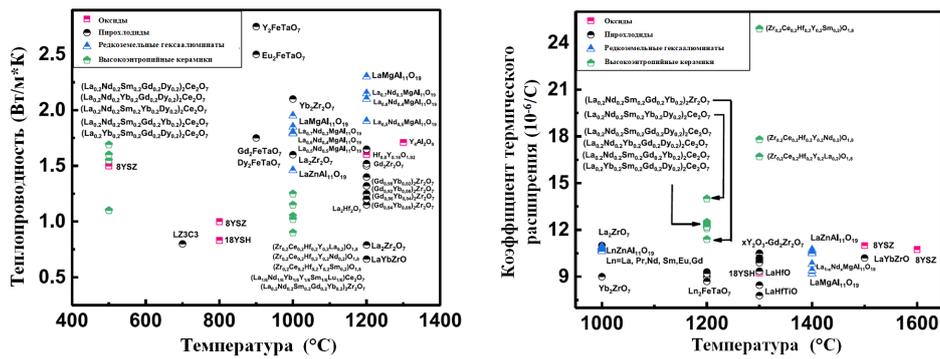


Рис. 6. Коэффициенты теплопроводности и термического расширения для различных используемых и перспективных составов ТБП [13]

Fig. 6. Coefficients of thermal conductivity and thermal expansion for various used and promising TBC compositions [13]

Таблица 3

Характеристики различных используемых и перспективных составов термобарьерных покрытий [47, 48]

Table 3

Characteristics of various used and promising compositions of thermal barrier coatings [47, 48]

Материалы	Коэффициент теплового расширения (10 ⁻⁶ /К)	Теплопроводность (Вт/м*К)	Преимущества	Недостатки
Оксиды (например, 7-8 YSZ)	11,5	2,12	Высокий коэффициент теплового расширения, низкая теплопроводность, высокая трещиностойкость	Спекание выше 1200 °С, фазовое превращение, коррозия
Перовскиты (например, SrZrO ₃)	10,9	2,3	Высокая температура плавления, высокие значения термоциклирования при температурах выше 1250 °С	Фазовое преобразование, низкая трещиностойкость
Пироклор (например GdZr ₂ O ₇)	10,4	1,6	Высокая термостойкость (отсутствие фазовых превращений до 2000 °С), низкая теплопроводность, низкая склонность к спеканию	Относительно низкий коэффициент теплового расширения, низкий уровень трещиностойкости
Магнито-плюмбит (например, LaMgAl ₁₁ O ₁₉)	9,5	2,7	Высокая температура плавления, низкая теплопроводность, высокая стойкость к спеканию	Усадка, вызванная перекристаллизацией

В этих двухслойных конструкциях YSZ обеспечивает хорошую прочность, близкую к связующему покрытию, в то время как пироклорный материал, нанесенный сверху, обеспечивает низкое спекание и высокую термостойкость. Такие двухслойные системы на основе пироклора/YSZ показали отличные высокотемпературные характеристики, значительно лучшие, чем у YSZ (см. рис. 5), и ожидается, что они улучшат эксплуатационные характеристики деталей горячего тракта газовых турбин при их применении [6].

Гексаалюминаты лантаната со структурой магнитоплюмбита (см. рис. 6) уже используются в области лазерной техники, катализа и магнетизма [40, 41]. Благодаря их высокой температуре плавления, высокому тепловому расширению, низкой теплопроводности, стойкости к длительному спеканию и структурной стабильности до 1 800 °С, эти материалы также можно признать перспективными для нанесения ТБП. Номинальный состав - $(La, Nd)MAl_{11}O_{19}$, где М может быть Mg, Mn в Zn, Cr, Sm [42]. Также было показано, что полезным является добавление Li [43]. Среди них наиболее интересным является $LaMgAl_{11}O_{19}$, который был исследован с точки зрения его теплофизических свойств при воздушно-плазменном напылении [44–46].

Преимущества и недостатки рассматриваемых составов ТБП на основе оксидов (например, 7-8 YSZ), перовскитов (например, $SrZrO_3$), пироксенов (например, $GdZr_2O_7$) и магнитоплюмбитов (например, $LaMgAl_{11}O_{19}$) представлены в табл. 3.

К перспективным материалам для использования в качестве ТБП относят также классы перовскитов ABO_3 с жесткой кристаллической структурой, стабильной при высоких температурах, а также цирконатов со структурой $BaZrO_3$ (см. рис. 6).

Выводы

Температуры продуктов сгорания 1200 – 1700 °С, свойственные современным эксплуатируемым и проектируемым ГТУ и ГТД, предопределяют необходимость разработки новых составов термобарьерных покрытий и усовершенствования способов их формирования.

На сегодняшний день рассматривается два основных направления: технологическое развитие способов формирования термобарьерных покрытий за счет их совершенствования и разработка новых составов керамических покрытий с видоизмененной многослойной градиентной структурой, состоящих из оксидов редкоземельных металлов.

Совершенствование способов формирования покрытий может быть осуществлено за счет использования новых методов производства, таких как агломерация и спекание порошков для получения ТБП, применения новых технологий напыления для снижения времени процесса нанесения, повышения однородности, и «вертикально сегментированной» структуры, использование модифицированного PVD процесса для получения покрытия, невосприимчивого к напряжениям.

Суспензионное плазменное напыление (SPS) и плазменное напыление с использованием прекурсоров (SPPS), привели к разработке термобарьерных покрытий с низкой теплопроводностью и лучшей устойчивостью к деформации, чем у покрытий, сформированных с использованием атмосферного плазменного напыления (APS). Хорошим потенциалом обладает гибридное плазменное напыление (PS) и способа физического осаждения из паровой фазы (PVD), известный как PS-PVD. Метод физического осаждения из паровой фазы с использованием «горячих» мишеней магнетронных распылительных систем (MS-PVD), а также различные варианты использования химического осаждения из паровой фазы (CVD) и высокоскоростного напыления в кислороде (HVOF) изучаются для получения современных термобарьерных покрытий с низкой теплопроводностью и стойкостью к термоциклированию.

Наибольшее применение пока находят покрытия на основе оксида циркония, стабилизированного иттрием (YSZ), но с учетом повышения температур эксплуатации возникает необходимость их усовершенствования или поиска и разработки новых составов покрытий. На сегодняшний день это достигается путем:

- совершенствования существующей базовой системы на основе Zr–Y–O путем создания многослойных, градиентных покрытий, например $(La_2Zr_2O_7)$ или $(LaMgAl_{11}O_{19})/YSZ$ для снижения коэффициента теплопроводности до значений 1,1–1,5 Вт/(м·К);
- разработки новых керамик, основанных на применении Hf, Ce с более высокими эксплуатационными характеристиками (снижение коэффициента теплопроводности примерно до 0,9 Вт/(м·К) и повышение температуры эксплуатации до 1500 °С и более);

- оптимизации кристаллической структуры керамического слоя и переход к градиентной системе легирования;
- разработки высокочистых материалов на основе циркония, с повышенным сопротивлением спеканию при высоких температурах;
- оптимизации пористой структуры покрытий для снижения коэффициента теплопроводности;
- разработки современных материалов с низкой теплопроводностью на основе материалов со структурой пироксена, перовскита или перспективных оксидных соединений с высокими теплозащитными свойствами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Liu D., Mu R., He L., Li S., Yang W. Failure behaviour of EB-PVD YSZ thermal barrier coatings under simulated aero-engine operating conditions, *Surface and Coatings Technology*. 474 (2023) 130027.
- [2] Sankar V., Ramkumar P.B., Sebastian D., Joseph D., Jose J., Kurian A. Optimized Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blades, *Materials Today: Proceedings*. 11 (3) (2019) 912–919.
- [3] Wang Z., Wang Z., Zhang T., Guo W., Dai H., Ding K. Reliability evaluation of thermal barrier coatings for engine combustion chambers based on Monte-Carlo simulation, *Surface and Coatings Technology*. 448 (2022) 128923.
- [4] Lashmi P.G., Ananthapadmanabhan P.V., Unnikrishnan G., Aruna S.T. Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems, *Journal of the European Ceramic Society*. 40 (2020) 2731–2745.
- [5] Reddy G.V., Rasu N.G., Kumar M.M.J., Prasad T.H. Review on Ad-vanced Alternative Thermal Barrier Coatings (TBC's) Materials in Low Heat Re-jection Engines, *IJRMET*. 6 (2) 2016 27–35.
- [6] Vaßen R., Jarligo M.O., Steinke T., Mack D.E., Stöver D. Overview on advanced thermal barrier coatings, *Surf. Coatings Technol.* 205 (2010) 938–942.
- [7] Clarke D.R., Oechsner M., Padture N.P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*. 37 (2012) 891–898.
- [8] Schulz U., Leyens C., Fritscher K., Peters M., Saruhan-Brings B., Lavigne O., Dorvaux J.M., Poulain M., Mévrel R., Caliez M. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings, *Aerosp. Sci. Tech-nol.* 7 (2003) 73–80.
- [9] Herman H., Sampath S., McCune R. Thermal spray: current status and future trends, *MRS Bull.* 25 (2000) 17–25.
- [10] Perepezko J.H. The hotter the engine, the better, *Science*. 326 (2009) 1068–106.
- [11] Metting C.J., Bunn J.K., Underwood E., Smoak S., Hat-trick-Simpers J. Combinatorial approach to turbine bond coat discovery, *ACS Comb. Sci.* 15 (2013) 419–424.
- [12] Padture N.P. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications, *Science*. 296 (2002) 280–284.
- [13] Liu L., Wang S., Zhang B., Jiang G., Liu H., Yang J., Wang J., Liu W. Present status and prospects of nanostructured thermal barrier coatings and their performance improvement strategies: A review, *Journal of Manufacturing Processes*. 97 (2023) 12–34.
- [14] Song N., Wang Z., Xing Y., Zhang M., Wu P., Qian F. Evaluation of phase transformation and mechanical properties of metastable yttria-stabilized zirconia by nanoindentation, *Materials*. 12 (2019) 1677.
- [15] Lamuta C., Di Girolamo G., Pagnotta L. Microstructural, mechanical and tribological properties of nanostructured YSZ coatings produced with different APS process parameters, *Ceram Int.* 41 (2015) 8904–8914.
- [16] Pourshahsavari R., Yaghtin A., Hosseinabadi N. Hot corrosion and thermal shock performance of nanoparticulate YSZ coatings deposited via suspension plasma spraying (SPS), *Materials Chemistry and Physics*. 297 (2023) 127406.
- [17] Gi'zy'nski M., Chen X., Araki H., Tanaka H., Kuroda S., Watanabe M. Sintering characteristics of thermal barrier YSZ coatings made by suspension plasma spraying, *J Therm. Spray Technol.* 31 (2022) 1521–1539.

[18] Ridley M., Garcia E., Kane K., Sampath S., Pint B. Environmental barrier coatings on enhanced roughness SiC: Effect of plasma spraying conditions on properties and performance, *Journal of the European Ceramic Society*. 43 (14) (2023) 6473–6481.

[19] Cheng Z., Yang J., Shao F., Zhong X., Zhao H., Zhuang Y. Thermal stability of YSZ coatings deposited by plasma spray-physical vapor deposition, *Coatings*. 9 (2019) 464.

[20] Yildirim C., Kaçar E., Kisacik Ö., Eseroğlu C., Doyuran H. Investigating mechanical properties of B4C films produced by magnetron sputtering PVD, *Solid State Sciences*. (2023) 107336.

[21] Yin J., Zhang X., Feng J., Zhang X., Song J., Liu M., Zeng D., Mao J., Deng C., Deng Z., Zhao R., Li S. Effect of powder composition upon plasma spray-physical vapor deposition of 8YSZ columnar coating, *Ceramics International*. 46 (10B) (2020) 15867–15875.

[22] Качалин Г.В., Парфененок М.А., Медников А.Ф., Медников А.Ф. Разработки НИУ "МЭИ" по формированию жаростойких и термобарьерных покрытий для энергетических газовых турбин // Газо-турбинные технологии. 2020. № 8 (175). С. 20–24.

[23] Kumar R., Cietek D., Jiang C., Roth J., Gell M., Jordan E.H. Influence of microstructure on the durability of gadolinium zirconate thermal barrier coatings using APS & SPPS processes, *Surface & Coatings Technology*. 337 (2018) 117–125.

[24] Liu Y., Zhen Z., Wang X., Mu R., He L., Xu Z. Thermo-physical properties, morphology and thermal shock behavior of EB-PVD thermal barrier coating with DLC YbGdZrO/YSZ system, *Materials Today Communications*. 35 (2023) 106265.

[25] Song J.B., Wang L.S., Dong H., Yao J.T. Long lifespan thermal barrier coatings overview: materials, manufacturing, failure mechanisms, and multiscale structural design, *Ceram. Int.* 49 (2023) 1–23.

[26] Kebriyaei A., Rahimipour M.R., Razavi M., Herfati A.A. Effect of solution precursor on microstructure and high-temperature properties of the thermal barrier coating made by solution precursor plasma spray (SPPS) process, *J. Therm. Spray Technol.* 32 (2023) 8–28.

[27] Wei Z., Zhang L., Wang K., Cheng J., Hong S. Improving the long-term corrosion resistance of HVOF sprayed WC-Cr3C2-Ni coating by vacuum sealing with silicone resin. *Journal of materials research and technology*. 26 (2023) 344–355.

[28] Shi J., Liu S.H., Wei L.L., Li S., Liu D.R., Peng H., Guo H.B. Effects of different nano-agglomerated powders on the microstructures of PS-PVD YSZ coatings, *Ceramics International*. 49 (2023) 2157–2166.

[29] Cheng Z., Yang J., Shao F., Zhong X., Zhao H., Zhuang Y. Thermal stability of PS-PVD YSZ coatings with typical dense layered and columnar structures, *Crystals*. 10 (2020) 826.

[30] Горелов В.П., Беляков С.А., Абдурахимова Р.К. Фазовые переходы в моноклинном ZrO₂ // Физика твердого тела. 2023. Т. 65, № 3. С. 472–477.

[31] Miller R.A., Garlick R.G., Smialek J.L. Phase distributions in plasma-sprayed zirconia-yttria, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 62 (1983) 1355–1358.

[32] Abbas H.A., Hamad F.F., Mohamad A.K., Hanafi Z.M., Kilo M. Structural properties of zirconia doped with some oxides, *Diffus. Fundam.* 8 (7) (2008) 1–8.

[33] Chen P., Wang Q., Hu D., Zhu D., Chen H., Dai Z., Liu Q., Li J. Fabrication and microstructure evolution of 8 mol% yttria-stabilized zirconia (8YSZ) transparent ceramics from co-precipitated nanopowders, *Optical Materials*. 142 (2023) 113997.

[34] Zhang Z., Hu C.C., Chen H., Ren Z.P., He J. Effects of reactive elements and Pt doping on the adhesive strength and tension property of α -Al₂O₃/ γ '-Ni₃Al-S interface, *Materials Today Communications*. 37 (2023) 107248.

[35] Wu Y., Hong D., Zhong X., Niu Y., Zheng X. Research progress on hafnium-based thermal barrier coatings materials, *Ceramics International*. 49(13) (2023) 21133–21141.

[36] Goto T. A review: structural oxide coatings by laser chemical vapor deposition, *J. Wuhan University of Technology*. 31 (1) (2016) 1–5.

- [37] **Goto T.** Integration of multifunctional properties in thermal barrier coatings by chemical vapor deposition, *Ceramic Integration and Joining Technologies: from Macro to Nanoscale*. 1st. ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. (2011) 393–413.
- [38] **Varanasi V.G., Besmann T.M., Hyde R.L., Payzant E.A., Anderson T.J.** MOCVD of YSZ coatings using β -diketonate precursors, *J. Alloys Compd.* 470 (2009) 354–359.
- [39] **Movchan B.A., Yakovchuk K.Yu.** Advanced graded protective coatings, deposited by EB-PVD. *Mater. Sci. Forum.* 546 (2007) 1681–1688.
- [40] **Яковчук К.Ю., Рудой Ю.Э., Нероденко Л.М., Оноприенко Е.В., Ахтырский А.О.** Влияние кривизны поверхности подложки на структуру и свойства термобарьерных, конденсационных покрытий, Электронно-лучевые процессы. СЭМ, 2011, № 1, С. 22–29.
- [41] **Movchan B.A., Yakovchuk K.Yu.** Graded thermal barrier coatings, deposited by EB-PVD, *Surface & Coatings Technology.* 188–189 (2004) 85–92.
- [42] **Higuera F.J., Belzunce A., Carriles S.** Influence of the thermal-spray procedure on the properties of a nickel-chromium coating, *Journal Of Materials Science.* 37 (2002) 649–654.
- [43] **Scrivani A., Bardi U., Carrafiello L., Lavacchi A., Niccolai F., Rizzi G.** A Comparative Study of High Velocity Oxygen Fuel, Vacuum Plasma Spray, and Axial Plasma Spray for the Deposition of CoNiCrAlY Bond Coat Alloy, *Journal of Thermal Spray Technology.* 12 (4) (2003) 504–507.
- [44] **Frolov V.A., Poklad V.A., Ryabenko B.V., Viktorenkov D.V.** Technological Features Of Coating Components Of Gas Turbine Engines By The HVOF Method, *Welding International.* 18 (4) (2004) 320–323.
- [45] **Lina J., Stinnett T.C., Lina J.** Development of thermal barrier coatings using reactive pulsed dc magnetron sputtering for thermal protection of titanium alloys. *Surface & Coatings Technology* 403 (2020) 126377.
- [46] **Li Z., Qian S., Wang W., Liu J.** Microstructure and oxidation resistance of magnetron-sputtered nanocrystalline NiCoCrAlY coatings on nickel-based superalloy, *J. Alloys Compd.* 505 (2010) 675–679.
- [47] **Ren K., Wang Q., Shao G., Zhao X., Wang Y.** Multicomponent high-entropy zirconates with comprehensive properties for advanced thermal barrier coating, *Scr. Mater.* 178 (2020) 382–386.
- [48] **Zhang L., Wang W., Zhou N., Dong X., Yuan F., He R.** Low temperature fabrication of Cf/BNi/(Ti_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2})C-SiCm high entropy ceramic matrix composite by slurry coating and laminating combined with precursor infiltration and pyrolysis, *J. Eur. Ceram. Soc.* 42 (2022) 3099–3106.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МЕДНИКОВ Алексей Феликсович – ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», канд. техн. наук.

E-mail: MednikovAlF@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4883-7873>

МЕДВЕДЕВ Константин Сергеевич – ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», без степени.

E-mail: mdvdv@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1667-458X>

КАЧАЛИН Геннадий Викторович – ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», канд. техн. наук.

E-mail: KachalinGV@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9506-862X>

ТХАБИСИМОВ Александр Борисович – старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет "МЭИ", канд. техн. наук.

E-mail: abt-bkt@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9544-9086>

КАЧАЛИНА Елена Викторовна – доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», канд. техн. наук.

E-mail: KachalinaYV@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2431-5886>

REFERENCES

- [1] **D. Liu, R. Mu, L. He, S. Li, W. Yang**, Failure behaviour of EB-PVD YSZ thermal barrier coatings under simulated aero-engine operating conditions, *Surface and Coatings Technology*. 474 (2023) 130027.
- [2] **V. Sankar, P.B. Ramkumar, D. Sebastian, D. Joseph, J. Jose, A. Kurian**, Optimized Thermal Barrier Coating for Gas Turbine Blades, *Materials Today: Proceedings*. 11 (3) (2019) 912–919.
- [3] **Z. Wang, Z. Wang, T. Zhang, W. Guo, H. Dai, K. Ding**, Reliability evaluation of thermal barrier coatings for engine combustion chambers based on Monte-Carlo simulation, *Surface and Coatings Technology*. 448 (2022) 128923.
- [4] **P.G. Lashmi, P.V. Ananthapadmanabhan, G. Unnikrishnan, S.T. Aruna**, Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems, *Journal of the European Ceramic Society*. 40 (2020) 2731–2745.
- [5] **G.V. Reddy, N.G. Rasu, M.M.J. Kumar, T.H. Prasad**, Review on Advanced Alternative Thermal Barrier Coatings (TBC's) Materials in Low Heat Rejection Engines, *IJRMET*. 6 (2) 2016 27–35.
- [6] **R. Vaßen, M.O. Jarligo, T. Steinke, D.E. Mack, D. Stöver**, Overview on advanced thermal barrier coatings, *Surf. Coatings Technol.* 205 (2010) 938–942.
- [7] **D.R. Clarke, M. Oechsner, N.P. Padture**, Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*. 37 (2012) 891–898.
- [8] **U. Schulz, C. Leyens, K. Fritscher, M. Peters, B. Saruhan-Brings, O. Lavigne, J.M. Dorvaux, M. Poulain, R. Mévrel, M. Caliez**, Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings, *Aerosp. Sci. Tech-nol.* 7 (2003) 73–80.
- [9] **H. Herman, S. Sampath, R. McCune**, Thermal spray: current status and future trends, *MRS Bull.* 25 (2000) 17–25.
- [10] **J.H. Perepezko**, The hotter the engine, the better, *Science*. 326 (2009) 1068–106.
- [11] **C.J. Metting, J.K. Bunn, E. Underwood, S. Smoak, J. Hattrick-Simpers**, Combinatorial approach to turbine bond coat discovery, *ACS Comb. Sci.* 15 (2013) 419–424.
- [12] **N.P. Padture**, Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications, *Science*. 296 (2002) 280–284.
- [13] **L. Liu, S. Wang, B. Zhang, G. Jiang, H. Liu, J. Yang, J. Wang, W. Liu**, Present status and prospects of nanostructured thermal barrier coatings and their performance improvement strategies: A review, *Journal of Manufacturing Processes*. 97 (2023) 12–34.
- [14] **N. Song, Z. Wang, Y. Xing, M. Zhang, P. Wu, F. Qian**, Evaluation of phase transformation and mechanical properties of metastable yttria-stabilized zirconia by nanoindentation, *Materials*. 12 (2019) 1677.
- [15] **C. Lamuta, G. Di Girolamo, L. Pagnotta**, Microstructural, mechanical and tribological properties of nanostructured YSZ coatings produced with different APS process parameters, *Ceram Int.* 41 (2015) 8904–8914.
- [16] **R. Pourshahsavari, A. Yaghtin, N. Hosseinabadi**, Hot corrosion and thermal shock performance of nanoparticulate YSZ coatings deposited via suspension plasma spraying (SPS), *Materials Chemistry and Physics*. 297 (2023) 127406.

- [17] **M. Gi' zy'nski, X. Chen, H. Araki, H. Tanaka, S. Kuroda, M. Watanabe**, Sintering characteristics of thermal barrier YSZ coatings made by suspension plasma spraying, *J Therm. Spray Technol.* 31 (2022) 1521–1539.
- [18] **M. Ridley, E. Garcia, K. Kane, S. Sampath, B. Pint**, Environmental barrier coatings on enhanced roughness SiC: Effect of plasma spraying conditions on properties and performance, *Journal of the European Ceramic Society.* 43(14) (2023) 6473–6481.
- [19] **Z. Cheng, J. Yang, F. Shao, X. Zhong, H. Zhao, Y. Zhuang**, Thermal stability of YSZ coatings deposited by plasma spray-physical vapor deposition, *Coatings.* 9 (2019) 464.
- [20] **C. Yildirim, E. Kaçar, Ö. Kisacik, C. Eseroğlu, H. Doyuran**, Investigating mechanical properties of B4C films produced by magnetron sputtering PVD, *Solid State Sciences.* (2023) 107336.
- [21] **J. Yin, X. Zhang, J. Feng, X. Zhang, J. Song, M. Liu, D. Zeng, J. Mao, C. Deng, C. Deng, Z. Deng, R. Zhao, S. Li**, Effect of powder composition upon plasma spray-physical vapor deposition of 8YSZ columnar coating, *Ceramics International.* 46 (10B) (2020) 15867–15875.
- [22] **G.V. Kachalin, M.A. Parfenenok, A.F. Mednikov, A.F. Mednikov**, Razrabotki NIU "MEI" po formirovaniyu zharostoykikh i termobaryernykh pokrytiy dlya energeticheskikh gazovykh turbin // *Gazoturbinnyye tekhnologii.* 2020. № 8 (175). S. 20–24.
- [23] **R. Kumar, D. Cietek, C. Jiang, J. Roth, M. Gell, E.H. Jordan**, Influence of microstructure on the durability of gadolinium zirconate thermal barrier coatings using APS & SPPS processes, *Surface & Coatings Technology.* 337 (2018) 117–125.
- [24] **Y. Liu, Z. Zhen, X. Wang, R. Mu, L. He, Z. Xu**, Thermo-physical properties, morphology and thermal shock behavior of EB-PVD thermal barrier coating with DLC YbGdZrO/YSZ system, *Materials Today Communications.* 35 (2023) 106265.
- [25] **J.B. Song, L.S. Wang, H. Dong, J.T. Yao**, Long lifespan thermal barrier coatings overview: materials, manufacturing, failure mechanisms, and multiscale structural design, *Ceram. Int.* 49 (2023) 1–23.
- [26] **A. Kebriyaei, M.R. Rahimipour, M. Razavi, A.A. Herfati**, Effect of solution precursor on microstructure and high-temperature properties of the thermal barrier coating made by solution precursor plasma spray (SPPS) process, *J. Therm. Spray Technol.* 32 (2023) 8–28.
- [27] **Z. Wei, L. Zhang, K. Wang, J. Cheng, S. Hong**, Improving the long-term corrosion resistance of HVOF sprayed WC-Cr3C2-Ni coating by vacuum sealing with silicone resin. *Journal of materials research and technology.* 26 (2023) 344–355.
- [28] **J. Shi, S.H. Liu, L.L. Wei, S. Li, D.R. Liu, H. Peng, H.B. Guo**, Effects of different nano-agglomerated powders on the microstructures of PS-PVD YSZ coatings, *Ceramics International.* 49 (2023) 2157–2166.
- [29] **Z. Cheng, J. Yang, F. Shao, X. Zhong, H. Zhao, Y. Zhuang**, Thermal stability of PS-PVD YSZ coatings with typical dense layered and columnar structures, *Crystals.* 10 (2020) 826.
- [30] **V.P. Gorelov, S.A. Belyakov, R.K. Abdurakhimova**, Fazovyye perekhody v monoklinnom ZrO2 // *Fizika tverdogo tela.* 2023. T. 65, № 3. S. 472–477.
- [31] **R.A. Miller, R.G. Garlick, J.L. Smialek**, Phase distributions in plasma-sprayed zirconia-yttria, *Am. Ceram. Soc. Bull.* 62 (1983) 1355–1358.
- [32] **H.A. Abbas, F.F. Hamad, A.K. Mohamad, Z.M. Hanafi, M. Kilo**, Structural properties of zirconia doped with some oxides, *Diffus. Fundam.* 8 (7) (2008) 1–8.
- [33] **P. Chen, Q. Wang, D. Hu, D. Zhu, H. Chen, Z. Dai, Q. Liu, J. Li**, Fabrication and microstructure evolution of 8 mol% yttria-stabilized zirconia (8YSZ) transparent ceramics from co-precipitated nanopowders, *Optical Materials.* 142 (2023) 113997.
- [34] **Z. Zhang, C.C. Hu, H. Chen, Z.P. Ren, J. He**, Effects of reactive elements and Pt doping on the adhesive strength and tension property of α -Al2O3/ γ '-Ni3Al-S interface, *Materials Today Communications.* 37 (2023) 107248.
- [35] **Y. Wu, D. Hong, X. Zhong, Y. Niu, X. Zheng**, Research progress on hafnium-based thermal barrier coatings materials, *Ceramics International.* 49 (13) (2023) 21133–21141.

- [36] **T. Goto**, A review: structural oxide coatings by laser chemical vapor deposition, *J. Wuhan University of Technology*. 31 (1) (2016) 1–5.
- [37] **T. Goto**, Integration of multifunctional properties in thermal barrier coatings by chemical vapor deposition, *Ceramic Integration and Joining Technologies: from Macro to Nanoscale*. 1st. ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc. (2011) 393–413.
- [38] **V.G. Varanasi, T.M. Besmann, R.L. Hyde, E.A. Payzant, T.J. Anderson**, MOCVD of YSZ coatings using β -diketonate precursors, *J. Alloys Compd.* 470 (2009) 354–359.
- [39] **B.A. Movchan, K.Yu. Yakovchuk**, Advanced graded protective coatings, deposited by EB-PVD. *Mater. Sci. Forum.* 546 (2007) 1681–1688.
- [40] **K.Yu. Yakovchuk, Yu.E. Rudoy, L.M. Nerodenko, Ye.V. Onopriyenko, A.O. Akhtyrskiy**, Vliyaniye krivizny poverkhnosti podlozhki na strukturu i svoystva termobaryernykh, kondensatsionnykh pokrytiy, *Elektronno-luchevyye protsessy. SEM*, 2011, № 1, C. 22–29.
- [41] **B.A. Movchan, K.Yu. Yakovchuk**, Graded thermal barrier coatings, deposited by EB-PVD, *Surface & Coatings Technology*. 188–189 (2004) 85–92.
- [42] **F.J. Higuera, A. Belzunce, S. Carriles**, Influence of the thermal-spray procedure on the properties of a nickel-chromium coating, *Journal Of Materials Science*. 37 (2002) 649–654.
- [43] **A. Scrivani, U. Bardi, L. Carrafiello, A. Lavacchi, F. Niccolai, G. Rizzi**, A Comperitive Study of High Velocity Oxygen Fuel, Vacuum Plasma Spray, and Axial Plasma Spray for the Depozition of CoNiCrAlY Bond Coat Alloy, *Journal of Thermal Spray Technology*. 12 (4) (2003) 504–507.
- [44] **V.A. Frolov, V.A. Poklad, B.V. Ryabenko, D.V. Viktorenkov**, Technological Features Of Coating Components Of Gas Turbine Engines By The HVOF Method, *Welding International*. 18 (4) (2004) 320–323.
- [45] **J. Lina, T. C. Stinnett, J. Lina**, Development of thermal barrier coatings using reactive pulsed dc magnetron sputtering for thermal protection of titanium alloys. *Surface & Coatings Technology* 403 (2020) 126377.
- [46] **Z. Li, S. Qian, W. Wang, J. Liu**, Microstructure and oxidation re-sistance of magnetron-sputtered nanocrystalline NiCoCrAlY coatings on nickelbased superalloy, *J. Alloys Compd.* 505 (2010) 675–679.
- [47] **K. Ren, Q. Wang, G. Shao, X. Zhao, Y. Wang**, Multicomponent high-entropy zirconates with comprehensive properties for advanced thermal barrier coating, *Scr. Mater.* 178 (2020) 382–386.
- [48] **L. Zhang, W. Wang, N. Zhou, X. Dong, F. Yuan, R. He**, Low temperature fabrication of Cf/BNi/(Ti_{0.2}Zr_{0.2}Hf_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2})C-SiCm high entropy ceramic matrix composite by slurry coating and laminating combined with precursor infiltration and pyrolysis, *J. Eur. Ceram. Soc.* 42 (2022) 3099–3106.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexey F. MEDNIKOV – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute».*

E-mail: MednikovAlF@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4883-7873>

Konstantin S. MEDVEDEV – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute».*

E-mail: mdvdv@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1667-458X>

Gennadiy V. KACHALIN – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute».*

E-mail: KachalinGV@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9506-862X>

Alexander B. TKHABISIMOV – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute».*

E-mail: abt-bkt@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9544-9086>

Elena V. KACHALINA – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute».*

E-mail: KachalinaYV@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2431-5886>

Поступила: 26.10.2023; Одобрена: 23.11.2023; Принята: 27.11.2023.

Submitted: 26.10.2023; Approved: 23.11.2023; Accepted: 27.11.2023.