

УДК 678.84

С.А. Будиновский¹, П.А. Стехов¹, О.Н. Доронин¹, Н.И. Артеменко¹**ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ
КЕРАМИЧЕСКОГО СЛОЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-105-112

Рассмотрены механизмы разрушения и методики оценки работоспособности керамического слоя теплозащитного покрытия для деталей газотурбинных двигателей (ГТД). Показано, что основной причиной скалывания керамического слоя при эксплуатации ГТД является формирование термостимулированной оксидной зоны (ТСОЗ), которая образуется в процессе нанесения ТЗП и увеличивает свою толщину до критической величины, при достижении которой происходит скалывание керамики.

Ключевые слова: никелевые сплавы, керамический слой, теплозащитные покрытия (ТЗП), YSZ, термостимулированная оксидная зона (ТСОЗ), коэффициент теплопроводности.

S.A. Budinovskiy¹, P.A. Stekhov¹, O.N. Doronin¹, N.I. Artemenko¹**MAIN MECHANISMS OF DESTRUCTION
OF THE CERAMIC LAYER OF THERMAL BARRIER COATINGS (review)**

The article discusses various mechanisms of destruction and methods for assessing the performance of the ceramic layer of heat-shielding coating for parts of gas-turbine engines (GTE). The analysis showed that the main cause of spallation of the ceramic layer of the heat-shielding coating, during normal use of the product, is the formation of a thermal growing oxide, which is formed during the operation of the product and grows throughout the life of the resource, and has a critical value at which the ceramic layer is cleaving.

Keywords: nickel alloys, ceramic layer, thermal barrier coating (TBC), YSZ, thermal growing oxide (TGO), thermal conductivity coefficient.

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

Теплозащитные покрытия (ТЗП) находят применение на деталях горячего тракта ГТД из жаропрочных сплавов на основе никеля, рабочая температура которых определяется гарантированными характеристиками жаропрочности и в настоящее время не превышает 1150–1200°C. Область применения ТЗП – детали камеры сгорания, жаровой трубы, рабочие и сопловые лопатки турбины высокого давления, внешняя поверхность которых непосредственно имеет контакт с горячим газом турбины, температура которого в ряде случаев может превышать температуру плавления материала детали. Поэтому для обеспечения длительного ресурса работы в перечисленных деталях ГТД предусматривается система принудительного охлаждения по внутренней поверхности потоком части воздуха из компрессора. На организацию такой системы охлаждения уходит значительная часть полезной мощности двигателя, что существенно влияет на его технические характеристики в целом. Применение ТЗП позволяет снизить темпера-

туру на поверхности детали и продлить ресурс ее работы без увеличения расхода воздуха, либо поднять температуру рабочего газа и, соответственно, технические характеристики двигателя в целом.

Основным условием работы ТЗП является создание градиента температуры по толщине стенки детали между внешней поверхностью, на которую воздействует мощный тепловой поток ($1\text{--}2\text{ МВт/м}^2$), и внутренней, охлаждаемой воздухом.

В настоящее время в промышленности для защиты деталей из никелевых жаропрочных сплавов применяют самое распространенное ТЗП системы $\text{ZrO}_2\text{--}(7\text{--}8\%)\text{Y}_2\text{O}_3$ [1–8] с подслоем MSeAlY (M: Ni, Ni–Co). Основными методами нанесения керамических слоев ТЗП являются электронно-лучевое и атмосферное плазменное напыление [9]. Основными проблемами ТЗП являются снижение в процессе эксплуатации величины теплозащитного эффекта (разности температур на внешней и внутренней границах керамического слоя) и вероятность скола керамики из-за роста термостимулированной оксидной зоны.

Во ФГУП «ВИАМ» проводятся работы в области ТЗП и технологий их нанесения в рамках комплексной научной проблемы 17.3. «Многослойные жаростойкие и теплозащитные покрытия, наноструктурные упрочняющие эрозионно- и коррозионно-стойкие, износостойкие, антифреттинговые покрытия для защиты деталей горячего тракта и компрессора ГТД и ГТУ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [10].

Используемые материалы и методы исследования

Основным направлением исследований в данной работе является анализ условий работы ТЗП, механизмов разрушения керамического слоя, а также существующих аналитических моделей ТЗП с целью их дальнейшего усовершенствования для прогнозирования двух основных характеристик керамического слоя ТЗП: величины теплозащитного эффекта и срока службы до скалывания.

В настоящее время система ТЗП включает три слоя различного типа, состава и назначения:

- внутренний жаростойкий слой на основе сплавов NiCrAlY или $(\text{Ni}, \text{Pt})\text{Al}$ наносится непосредственно на подложку для защиты материала охлаждаемой детали ГТД от окисления;
- тонкая промежуточная термостимулированная оксидная зона (TCO_3), которая формируется из оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ на поверхности металлического слоя;
- внешний керамический слой, выполняющий теплозащитную функцию.

Удовлетворительное сцепление металлического и керамического слоев обеспечивается формированием на границе «металл–керамика» тонкого ($\sim 1\text{ мкм}$) связывающего или «клеящего» слоя оксида алюминия. Для предотвращения скалывания ТЗП в условиях интенсивного циклического нагрева до рабочих температур, при которых на границе «металл–керамика» из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) возникают значительные термические напряжения, керамический слой предпочтительно должен иметь специальную столбчатую структуру.

Керамический слой ТЗП в расчетной модели теплопередачи следует рассматривать как плоскую стенку. Температурное распределение по толщине покрытия является следствием основного закона теплопроводности Фурье и уравнения Ньютона–Рихмана [11] и описывается трансцендентным уравнением

$$T(\delta) = T_0 - \frac{q \cdot \delta \cdot 10^{-6}}{\lambda(T(\delta))}, \quad (1)$$

где T_0 – температура на поверхности керамического слоя, К; q – удельный тепловой поток, Вт/м^2 ; δ – толщина керамического слоя ТЗП, мкм; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

При прохождении теплового потока в направлении от поверхности керамического слоя ТЗП создается температурный градиент по сечению, вследствие чего изменяется значение коэффициента теплопроводности, зависящего от температуры. Типичный градиент температуры составляет величину $\sim 100^\circ\text{C}$, в связи с этим можно использовать линейную зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в малом промежутке:

$$\lambda(T(\delta))=a+b\cdot T(\delta), \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты.

Подставляя выражение (2) в уравнение (1), получаем:

$$T(\delta)=T_0-\frac{q\cdot\delta\cdot 10^{-6}}{a+b\cdot T(\delta)},$$

$$b(T(\delta))^2+(a-b\cdot T_0)\cdot T(\delta)+(q\cdot\delta\cdot 10^{-6}-a\cdot T_0)=0. \quad (3)$$

Решая уравнение (3), получаем:

$$T(\delta)=\frac{(b\cdot T_0-a)+\sqrt{(b\cdot T_0-a)^2-4b(q\cdot\delta\cdot 10^{-6}-a\cdot T_0)}}{2b}. \quad (4)$$

Полученное выражение (4) отражает зависимость температуры от глубины керамического слоя теплозащитного покрытия.

В работе [12] коэффициент теплопроводности керамического слоя ТЗП системы $\text{ZrO}_2-8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ при температуре 1100°C (1373 К) оценивали величиной 1,9 Вт/(м·К), при 1200°C (1473 К): 2,0 Вт/(м·К). В связи с этим зависимость коэффициента теплопроводности от температуры на участке 1373–1473 К имеет вид

$$\lambda(T)=0,527+0,001\cdot T, \quad (5)$$

и коэффициенты a и b из выражения (2) однозначно определены.

В работе [11] показана возможность вычисления среднего эквивалентного коэффициента теплопроводности по формуле

$$\lambda_{\text{экр}}=\frac{\int_{T_1}^{T_2}\lambda(T)dT}{T_1-T_2}=1,95 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Типовой величиной удельного теплового потока в деталях ГТД является величина 10^6 Вт/м², а толщина керамического слоя ТЗП составляет 100 мкм. Упрощенный расчет распределения температуры по толщине керамического слоя можно проводить по формуле (1), заменяя $\lambda(T(\delta))$ на $\lambda_{\text{экр}}$. Сравнивая разницу между упрощенным расчетом и расчетом по формуле (4), получим:

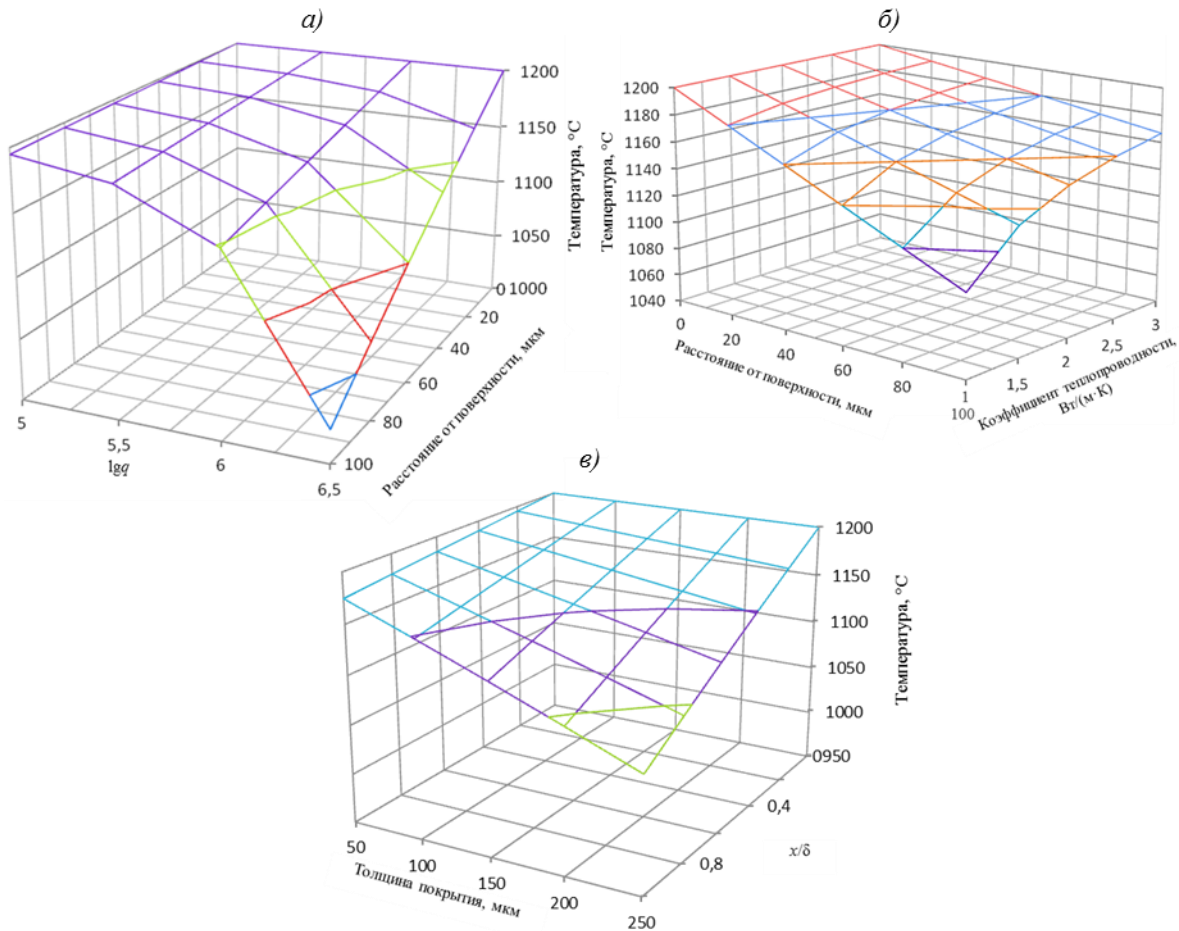
$$\varepsilon_{\text{отн}}=\frac{\int_0^{100}\frac{(b\cdot T_0-a)+\sqrt{(b\cdot T_0-a)^2-4b(q\cdot\delta\cdot 10^{-6}-a\cdot T_0)}}{2b}d\delta-\int_0^{100}\left(T_0-\frac{q\cdot\delta\cdot 10^{-6}}{\lambda_{\text{экр}}}\right)d\delta}{\int_0^{100}\frac{(b\cdot T_0-a)+\sqrt{(b\cdot T_0-a)^2-4b(q\cdot\delta\cdot 10^{-6}-a\cdot T_0)}}{2b}d\delta}\cdot 100\%=0,014\%.$$

Очевидно, что при заданных параметрах различия в методиках расчета незначительны.

Для определения влияния величины удельного теплового потока на температурное распределение произведен расчет по формуле (4) с варьированием параметра q : 10^5 ; $10^{5,5}$; 10^6 и $10^{6,5}$ Вт/м². Результаты расчета представлены на рисунке, *а*.

Для определения влияния величины коэффициента теплопроводности на температурное распределение произведен расчет по формуле (1) с варьированием параметра $\lambda_{\text{экв}}$ – от 1,0 до 3,0 Вт/(м·К) с шагом 0,5 Вт/(м·К). Результаты расчета представлены на рисунке, *б*.

Для определения влияния толщины керамического слоя на температурное распределение произведен расчет по формуле (4) с варьированием параметра δ – от 50 до 250 мкм с шагом 50 мкм. Результаты расчета представлены на рисунке, *в*.



Температурное распределение по сечению керамического слоя в зависимости от величины удельного теплового потока (*а*), коэффициента теплопроводности (*б*) и толщины покрытия (*в*); x – удаление от поверхности керамического слоя ТЗП, мкм; δ – толщина керамического слоя, мкм

Из приведенных расчетов следует, что теплозащитный эффект керамического слоя ТЗП возрастает благодаря:

- увеличению удельного теплового потока через сечение керамического слоя ТЗП;
- уменьшению коэффициента теплопроводности керамического слоя вследствие повышения пористости покрытия и/или оптимизации химического состава;
- увеличению толщины керамического слоя.

Скол керамического слоя ТЗП со столбчатой структурой может происходить в следующих основных случаях:

– в результате роста толщины оксидного слоя на основе – между металлическим соединительным слоем и керамическим слоем ТЗП. При толщине более 10–15 мкм происходит скалывание керамического слоя ТЗП по основному механизму скалывания при нормальных условиях эксплуатации;

– в результате спекания керамического слоя системы $ZrO_2+(7-8\%)Y_2O_3$ с полным или частичным превращением столбчатой структуры в монолитную при длительном (>50 ч) повышении температуры поверхности >1250°C. В дальнейшем, при циклическом температурном воздействии на лопатку происходит скалывание керамического слоя ТЗП в результате возникающих термических напряжений;

– в результате механического повреждения керамического слоя ТЗП при ударном воздействии на поверхность посторонних предметов;

– в результате отложения на поверхности керамического слоя ТЗП оксидных соединений кремния, магния, кальция и др. (CMAS-коррозия), расплавляющихся при рабочих температурах и проникающих в столбчатую структуру керамического слоя. Эти оксидные соединения затвердевают при последующем снижении температуры. Разница в значениях ТКЛР керамики системы $ZrO_2+(7-8\%)Y_2O_3$ и оксидных соединений приводит к возникновению термических напряжений и скалыванию керамического слоя ТЗП.

В области рабочих температур до 1150–1200°C определяющими с точки зрения срока службы ТЗП являются процессы высокотемпературного окисления на границе «металл–керамика», приводящие к увеличению толщины ТСОЗ.

В работе [13] рассмотрена модель разрушения столбчатых керамических слоев ТЗП при действии эксплуатационных нагрузок – исследовано поведение керамического слоя ТЗП при имитации работы. Показано, что при повышении толщины керамического слоя ТЗП напряжения у основания столбиков керамического слоя при действии центробежных сил возрастают. Указано на важность учета структуры керамического слоя – в случае столбчатой структуры отдельные столбики не имеют между собой связи, образуя пористую структуру. При получении математической модели [13] использован подход, учитывающий как общее нагруженное состояние лопатки, так и структуру керамического слоя. На основании зависимости максимальных напряжений изгиба указано, что оптимальная величина керамического слоя составляет 120 мкм, уменьшение этой величины может привести к повреждению жаростойкого соединительного слоя (ЖСС) из-за увеличения температуры на нем.

В работе [14] показаны механизмы разрушения керамического слоя ТЗП, нанесенного плазменным методом, при различных термических испытаниях. При испытаниях на изотермическую жаростойкость чаще всего керамический слой отслаивался по ТСОЗ, состоящей из оксида алюминия, которая образовалась из-за окисления ЖСС. Соответственно, достигнув критической величины ТСОЗ, происходит отслоение керамического слоя от поверхности соединительного слоя. Остальные механизмы наблюдаются при испытаниях на термоциклирование и возникают из-за дефектов, полученных при напылении керамического слоя покрытия.

Проведены также испытания разных типов порошков для напыления керамического слоя. Из полученных данных следует, что керамика разных составов спекается по-разному и невозможно выбрать керамику, которая сохраняет свои первоначальные свойства при разных испытаниях.

В работе [15] проведены испытания образцов с комплексным ТЗП и разной толщиной керамического слоя. В результате испытаний на установке с газовым нагревом установлено, что на образцах без повреждения керамического слоя происходит постепенное увеличение температурного градиента. Связано это с тем, что керамика теряет свою изначальную теплопроводность, накапливая повреждения

в структуре. Приведена основная причина формирования ТСОЗ на поверхности ЖСС – при критическом значении толщины ТСОЗ керамика отрывается от подслоя.

В работе [16] рассмотрено формирование ТСОЗ при разных составах и термообработках ЖСС. Проведены испытания на циклическую жаростойкость по циклу: нагрев до температуры 1121°C, выдержка в течение 25 ч и последующее охлаждение в течение 1 ч на воздухе. На образцах с ЖСС системы NiCrAlY с вакуумной термообработкой величина ТСОЗ на базе испытаний 400 ч составила 9,8 мкм, а на образцах без термообработки 12,3 мкм; на образцах с ЖСС системы NiCoCrAlYHfSi с вакуумной термообработкой величина ТСОЗ на базе испытаний 400 ч составила 13,5 мкм, а на образцах без термообработки 10,4 мкм. Проанализированы также эффекты вакуумной термообработки – например, фазовые превращения оксида циркония, стабилизированного иттрием. Так, после вакуумного отжига при температуре 1100°C в течение 3 ч фазовых превращений в керамическом слое не наблюдалось. Данные результаты показали, что формирование ТСОЗ зависит от состава связующего и от наличия термообработки ЖСС.

В работе [17] рассмотрена возможность применения дробеструйной обработки при подготовке поверхности ЖСС перед нанесением керамического слоя ТЗП плазменным методом. На образцах, прошедших дробеструйную обработку ТСОЗ, наблюдается уменьшение пористости соединительного слоя. После испытаний на жаростойкость, проводимых при температуре 1000°C, наблюдалось образование ТСОЗ на границе «ЖСС– керамический слой» вследствие проникновения кислорода. В результате проведенных испытаний образцы, подвергнутые дробеструйной обработке, демонстрируют более однородную структуру и меньшую толщину ТСОЗ. Такой вид обработки ЖСС уменьшает шероховатость покрытия и, соответственно, площадь образования ТСОЗ, которая формируется в процессе окисления соединительного слоя.

В работе [18] рассмотрена возможность прогнозирования работоспособности ТЗП. Проведены испытания на циклическую жаростойкость с использованием нескольких температур (1121 и 1151°C) и разных циклов продолжительностью 1 и 24 ч, также рассматривались несколько типов подслоев. Предложена методика прогнозирования работоспособности ТЗП. При полностью известных режимах работы изделия, ТСОЗ растет линейно и можно спрогнозировать время, когда оксидная зона достигнет критической величины и произойдет отрыв керамического слоя от связующего, однако при резких изменениях в режимах работы изделия невозможно точно оценить скорость роста ТСОЗ.

В работе [19] представлено моделирование процесса роста ТСОЗ. Показано, что трещины могут образовываться на ранних стадиях испытаний на циклическую жаростойкость. Трещины возникают на границе «ЖСС–ТСОЗ», тем не менее эти трещины не влияют на продолжительность жизненного цикла покрытия.

В работе [20] рассмотрена возможность контроля формирования ТСОЗ с помощью ультразвуковых и вихретоковых методов. Рассмотренный ультразвуковой метод исследования прост и может быть полезен только для использования в лаборатории, так как требует погружения в воду. Вихретоковый метод требует обширных знаний для интерпретации полученных результатов, но при этом метод позволяет исключить постановку на двигатель деталей, на которых величина ТСОЗ подходит к критической отметке.

В работе [21] приведено поведение различных систем ТЗП с керамическим слоем на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием. Рассмотрены два метода нанесения (электронно-лучевое и плазменное напыление) с разными типами ЖСС. Для ЖСС системы MCrAlY исследовано влияние изменения количества Со на

долговечность керамического слоя. Показано, что при повышенном количестве Co в жаростойком слое образуется более стабильная структура, что приводит к уменьшению тепловых напряжений при охлаждении. Установлено, что ТЗП со связующим слоем системы $NiPtAl$ имеет меньшую скорость роста пленки оксида алюминия и большую критическую величину этого слоя. Указано также на большую зависимость стойкости керамического слоя ТЗП, нанесенного методом плазменного напыления, на частоту циклов. Короткие циклы при испытаниях на циклическую жаростойкость существенно снижают жизненный цикл ТЗП из-за ускоренного образования трещин. Автор работы [21] указывает на отсутствие критической величины T_{CO_3} для плазменного напыления, показывая, что большой вклад в скалывание ТЗП вносит образование трещин при испытаниях.

В работе [22] представлены исследования деградации ТЗП после испытаний на изотермическую жаростойкость при разных выдержках. Показано, что с увеличением продолжительности испытаний при температуре $1100^\circ C$ в атмосфере воздуха происходит рост толщины T_{CO_3} . На основании проведенных исследований предложена последовательность процесса деградации ТЗП: формирование T_{CO_3} (преобладает соединение Al_2O_3), формирование и рост слоя комплексного оксида $(Ni, Cr)Al_2O_4$, образование микротрещин, отрыв керамического слоя в результате расслоения T_{CO_3} .

Заключения

Анализ рассмотренных источников в области механизмов и моделей разрушения керамического слоя ТЗП показал, что основной причиной разрушения при нормальных условиях эксплуатации изделия является T_{CO_3} , которая формируется с преимущественным образованием оксида алюминия. В настоящее время формирование T_{CO_3} требует дальнейшего изучения.

Толщина T_{CO_3} непрерывно растет на всем протяжении времени выработки изделием ресурса. С учетом того что увеличение толщины T_{CO_3} является результатом химической реакции, существенное влияние на скорость ее протекания оказывает температура. Таким образом, по толщине T_{CO_3} можно косвенно судить об уровне температур, которые действовали на границе «керамический слой–ЖСС».

ЛИТЕРАТУРА

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 36–52.
4. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.
5. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №8. С. 60–70.
6. 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: 11.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-5-5.
7. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17–20.

8. Terry S.G., Litty J.R., Levi C.G. Evolution of porosity and texture in thermal barrier coatings grown by EB-PVD // *Elevated Temperature Coatings: Science and Technology III*. The Minerals, Metals and Materials Society, 1999. P. 13–26.
9. Кашин Д.С., Стехов П.А. Современные теплозащитные покрытия полученные методом электронно-лучевого напыления (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №2. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-10-10.
10. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
11. Авдучевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
12. Schlichting K.W., Padture N.P., Klemens P.G. Thermal conductivity of dense and porous yttria-stabilized zirconia // *Journal of materials science*. 2001. No. 36. P. 3003–3010.
13. 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. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26030> (дата обращения: 11.12.2018).
14. Ильинкова Т.А., Валиев Р.Р., Тагиров А.Т. Долговечность плазменных теплозащитных покрытий в условиях термического нагружения // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2010. №2. С. 24–29.
15. Ильинкова Т.А., Ильинков А.В., Валиев Р.Р., Шигапов А.И. Исследование теплозащитных покрытий в условиях термического удара // *Тр. 8-й Междунар. конф. «Пленки и покрытия»*. 2007. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2007. С. 231–233.
16. Jung S.H., Jeon S.H., Park H. et al. Growth Behavior of Thermally Grown Oxide Layer with Bond Coat Species in Thermal Barrier Coatings // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2018. Vol. 55. No. 4. P. 344–351.
17. Karaoglanli A.C., Doleker K.M., Demire B. et al. Effect of shot peening on the oxidation behavior of thermal barrier coatings // *Applied Surface Science*. 2015. No. 354. P. 314–322.
18. Nirav V. Patel. Use of Thermally Grown Oxide Stress Measurements to Predict Remaining Life of Thermal Barrier Coatings under Realistic Turbine Engine Conditions: Master's Theses. 2014. 700 p.
19. Hille T.S., Turteltaub S., Suiker A.S.J. Oxide growth and damage evolution in thermal barrier coatings // *Engineering Fracture Mechanics*. 2011. No. 78. P. 2139–2152.
20. Fahr A., Rogé B., Thornton J. Detection of Thermally Grown Oxides in Thermal Barrier Coatings by Nondestructive Evaluation // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2006. Vol. 15. P. 46–52.
21. Song P. Influence of Material and Testing Parameters on the Lifetime of TBC Systems with MCrAlY and NiPtAl Bondcoats. Publikationsserver der RWTH Aachen University, 2012. 126 p.
22. Moskal G., Swadzba L., Mendala B. et al. Degradation of the TBC system during the static oxidation test // *Journal of Microscopy*. 2010. Vol. 237. Pt. 3. P. 450–455.