



УДК 629.7.023.224:629.7.03-226.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-7-7

**ВЫБОР КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК
АВИАЦИОННЫХ ТУРБИН НА РАБОЧИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ
ДО 1400°С**

Д.А. Чубаров

С.А. Будиновский

доктор технических наук

Апрель 2015

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Д.А. Чубаров¹, С.А. Будиновский¹

ВЫБОР КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ТУРБИН НА РАБОЧИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДО 1400°C

Рассмотрены преимущества и недостатки применяемого в настоящее время керамического слоя $ZrO_2-(7-8)\%Y_2O_3$ (цирконий, стабилизированный иттрием, – YSZ), широко используемого в серийных покрытиях для защиты рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей (ГТД). Приведены системы и некоторые свойства новых керамических материалов на основе оксида циркония с добавлением одного или более редкоземельных элементов, разрабатываемых в настоящее время за рубежом. Показаны разрабатываемые в ВИАМ керамические слои, наносимые магнетронным среднечастотным распылением мишеней на основе сплавов циркония с редкоземельными металлами с последующим плазмохимическим осаждением керамики в среде аргонокислородной плазмы. Исследована микроструктура поверхности нанесенных керамических слоев (КС), проведено определение коэффициента теплопроводности λ , а также дана оценка перспективности их применения при разработке теплозащитных покрытий (ТЗП) нового поколения.

Ключевые слова: теплозащитное покрытие, YSZ, газотурбинный двигатель.

D.A. Chubarov, S.A. Budinovskiy

CHOOSING CERAMIC MATERIALS FOR THERMAL BARRIER COATING OF GTE TURBINE BLADES ON WORKING TEMPERATURES UP TO 1400°C

The article considers advantages and disadvantages of currently used $ZrO_2-(7-8)\%Y_2O_3$ (yttrium-stabilized zirconia – YSZ) ceramic layer, widely used now in serial coatings to protect turbine blades of gas turbine engines. The systems and some properties of new ceramic materials based on zirconium oxide with the addition of one or more rare earth elements which are currently being developed abroad are represented. The ceramic layers developed by VIAM brought on by magnetron midrange targets sputtering based on zirconium alloys with rare earth metals with following plasma chemical ceramics deposition in the argon oxygen environment are shown. The microstructure of the surface of the deposited layers, thermal conductivity and the prospects of their use in the development of a new thermal barrier coating (TBC) generation are investigated.

Keywords: thermal barrier coating, YSZ, gas turbine engine.

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

Рабочие лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) подвергаются воздействию интенсивных тепловых и механических нагрузок в условиях высокотемпературного коррозионного разрушения поверхности агрессивной внешней средой [1–4]. В то же время необходимость повышения эффективности ГТД различного назначения требует увеличения рабочей температуры, которая ограничена температурой плавления жаропрочных сплавов на основе никеля. Наиболее эффективным средством защиты рабочих лопаток ГТД являются теплозащитные покрытия (ТЗП), поскольку их применение позволяет значительно (на 100°C и более) снизить рабочую температуру пера лопатки, либо поднять температуру рабочего газа перед турбиной [5–8]. Схема ТЗП представлена на рис. 1.

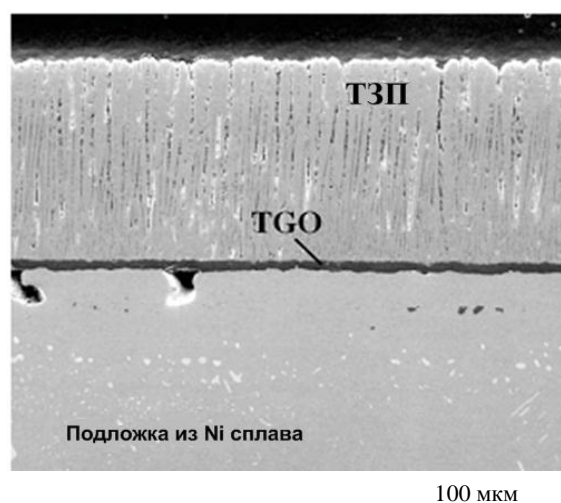


Рис. 1. Теплозащитное покрытие (ТЗП), нанесенное на рабочую лопатку турбины высокого давления ГТД

В настоящее время проводится поиск новых материалов для керамического слоя (КС), способных заменить систему $ZrO_2-8\% Y_2O_3$ (YSZ) [9]. В статье рассмотрены преимущества и недостатки данной системы, даны описание и характеристики предлагаемых в отечественных и зарубежных источниках новых материалов для керамического слоя. Стоит отметить, что для достижения наилучших показателей системы ТЗП проводится поиск новых составов для жаростойкого соединительного слоя [10–15], а также разработка новых способов нанесения ТЗП и совершенствование существующих, однако в данной статье эти вопросы не рассматриваются.

Материалы и методы

Покрывание YSZ: структура, преимущества, недостатки

Покрывание YSZ обладает комплексом свойств, благодаря которым в настоящее время этот материал является наилучшим для нанесения керамического слоя ТЗП. Покрывание имеет один из самых низких из всех керамических материалов коэффициент удельной теплопроводности при повышенной температуре ($\leq 2,3$ Вт/(м·К) при 1000°C для плавленого материала) вследствие высокой концентрации точечных дефектов – вакансий кислорода и замещенных атомов растворенного вещества. Покрывание YSZ также имеет относительно высокий температурный коэффициент линейного расширения $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что способствует снижению напряжений, являющихся результатом рассогласования термического расширения между керамическим покрыванием и металлом лопатки. Максимальная рабочая температура поверхности с покрыванием YSZ при эксплуатации не должна длительно превышать 1200°C – для предотвращения спекания керамики, которое ведет к увеличению коэффициента удельной теплопроводности [16].

Необходимо отметить, что для достижения теплозащитного эффекта в 100°C необходимо нанести слой керамики YSZ ~150 мкм, при этом весовые характеристики рабочих лопаток ТВД повышаются (~1 кг на каждый м² трактовой поверхности лопатки). Снижения массы лопаток с ТЗП и увеличения проходного сечения газоздушного тракта двигателя по сечению турбины можно достичь путем уменьшения толщины керамического слоя ТЗП, что возможно только путем снижения коэффициента теплопроводности керамического слоя [17].

Новые керамические материалы

В качестве перспективных материалов для керамического слоя ТЗП рассматриваются керамики на основе цирконатов РЗМ типа $\text{Me}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (где Me – Gd, Nd, Sm, La, Ce), имеющие теплопроводность ~1–1,5 Вт/(м·К), несклонные к спеканию при рабочих температурах до 1300–1400°C [18]. В США разработаны теплозащитные покрывания с внешним керамическим слоем для работы при температуре 1100°C. Наилучшие характеристики получены у покрывания состава $\text{La}(\text{Nd})_4\text{Zr}(\text{Hf})_3\text{O}_{12}$, разработанного фирмой General Electric Comp. (теплопроводность 1,0–1,2 Вт/(м·К) при ресурсе работы >1000 ч) [19], а также у покрывания системы $\text{ZrO}_2\text{–Y}_2\text{O}_3\text{–Nd}_2\text{O}_3$, разработанного фирмой Chromalloy (теплопроводность 0,6–1,0 Вт/(м·К) при температурах 600–1000°C) [20]. Агентством NASA (США) предложено использовать для КС ТЗП материалы системы $(\text{ZrO}_2\text{–Y}_2\text{O}_3)\text{–Nd}_2\text{O}_3(\text{Gd}_2\text{O}_3, \text{Sm}_2\text{O}_3)\text{–Yb}_2\text{O}_3(\text{Sc}_2\text{O}_3)$, имеющие при температурах до 1300°C теплопроводность 1 Вт/(м·К), которая слабо зависит от продолжительности высокотемпературной выдержки. Высокие свойства такой керамики авторы связывают

с образованием в структуре КС наноразмерных кластеров оксидов $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ или $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{--Yb}_2\text{O}_3$ [21].

Результаты

Для получения керамических слоев низкой теплопроводности в ВИАМ разработаны технология и оборудование для магнетронного среднечастотного распыления мишеней на основе сплавов циркония с редкоземельными металлами с последующим плазмохимическим осаждением керамики в среде аргонокислородной плазмы [22, 23]. Магнетронный процесс обеспечивает преимущества по сравнению с электронно-лучевым методом нанесения ТЗП [24], среди которых можно отметить снижение энергопотребления до 20 раз и уменьшение массы и габаритных размеров установки более чем в 5 раз.

По данной технологии нанесены и испытаны при 1400°C керамические слои различных составов. Испытания проводили при 1400°C в течение 100 ч в высокотемпературной вакуумной печи с нагревателями из вольфрама. Образцы с керамическим покрытием размещали в камере печи на поддоне и проводили откачку воздуха до остаточного давления не более 0,01 Па, затем – ступенчатый нагрев до 1400°C и выдержку при этой температуре. Исследования структуры полученных керамических слоев в исходном состоянии и после высокотемпературных испытаний представлены на рис. 2.

По результатам исследования установлено, что таким образом возможно получить столбчатую структуру КС покрытия, схожую со структурой, полученной методом электронно-лучевого нанесения (ЕВ-PVD), которая позволяет снизить коэффициент теплопроводности и повысить термостойкость покрытия.

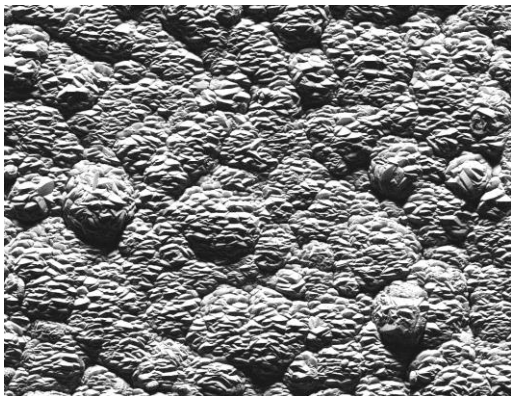
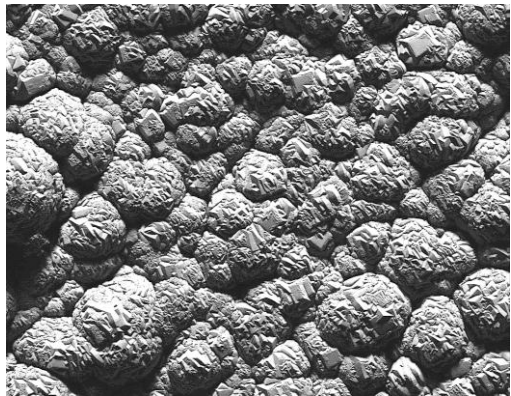
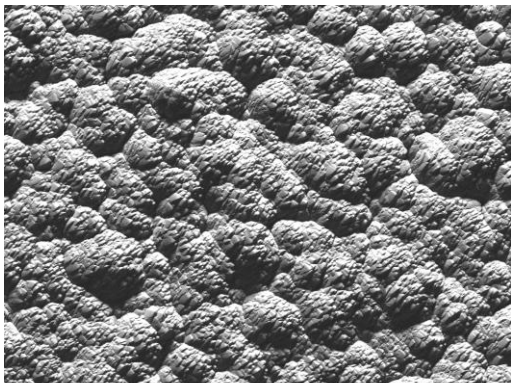
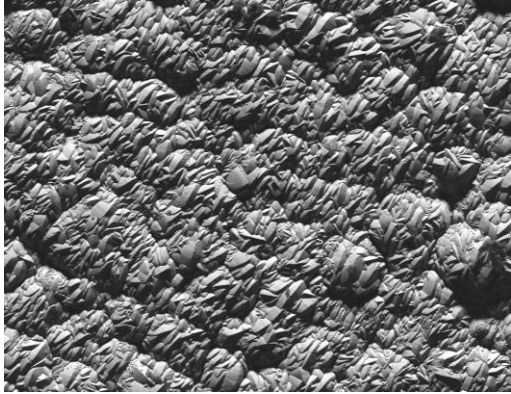
Проведено также определение коэффициента теплопроводности данных составов, результаты которого представлены на рис. 3.

Таким образом, можно сделать вывод, что методом магнетронного среднечастотного распыления можно получать керамические слои с коэффициентом теплопроводности $\sim 1,2\text{--}1,5$ Вт/(м·К).

Заключение

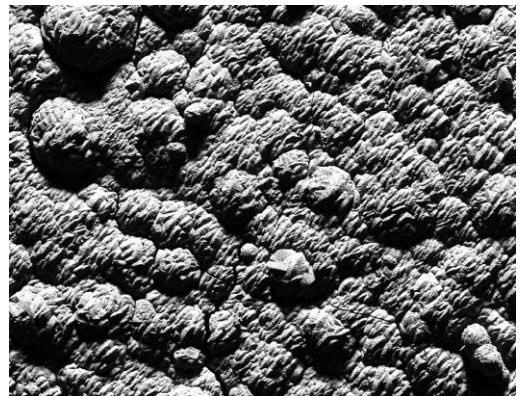
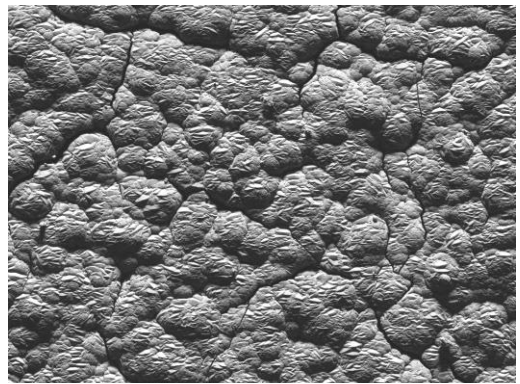
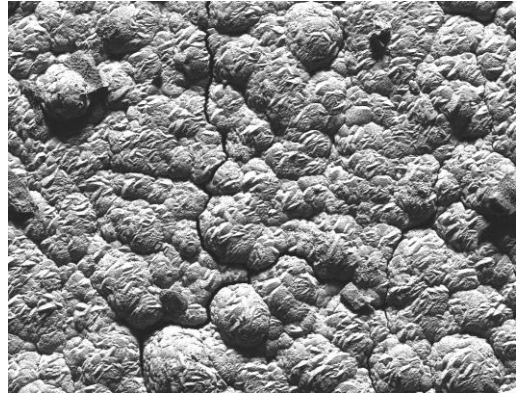
Для снижения коэффициента теплопроводности до значений $1,1\text{--}1,5$ Вт/(м·К), увеличения рабочей температуры до $1300\text{--}1400^\circ\text{C}$ и, соответственно, ресурса работы лопаток авиационных турбин и температуры рабочего газа перед турбиной необходимо совершенствование состава керамического слоя YSZ теплозащитного покрытия, путем введения одного и более редкоземельных элементов в композицию материала покрытия.

I



a)

II



b)

c)

d)

Рис. 2. Микроструктура ($\times 1000$) керамического слоя систем Zr–Y–Gd–Hf (а), Zr–Y–Nd–Hf (б), Zr–Y–Gd (в) и многослойного Zr–Y–Gd+Zr–Y–Hf (г) в исходном состоянии (I) и после высокотемпературных испытаний при 1400°C в течение 100 ч (II)

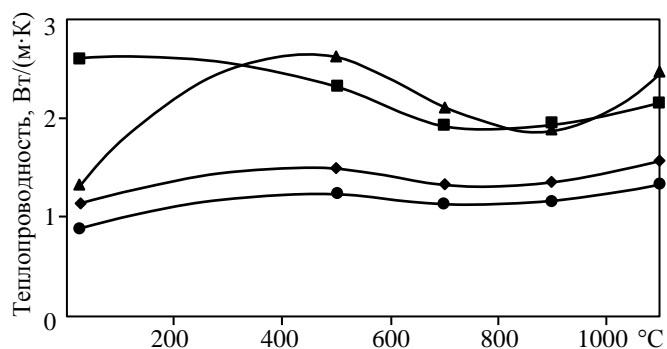


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности (λ) керамических слоев теплозащитного покрытия различного состава от температуры:

● – Zr–Y–Gd+Zr–Y–Hf; ▲ – Zr–Y–Gd; ◆ – Zr–Y–Gd–Hf; ■ – Zr–Y–Nd–Hf

Технология, разработанная в ВИАМ, позволяет получать столбчатую структуру керамических слоев ТЗП, схожую со структурой, полученной электронно-лучевым методом, которая является оптимальной в связи с тем, что она позволяет снизить коэффициент теплопроводности и повысить термостойкость керамики.

Разработанные керамические слои будут применяться для исследования комплексных ТЗП с целью их применения в перспективных двигателях военной и гражданской авиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М. Современное состояние и основные тенденции развития высокотемпературных теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД //Авиационная промышленность. 2008. №4. С. 33–37.
2. Кузнецов В.П., Лесников В.П., Конакова И.П. и др. Структура и фазовый состав монокристаллического сплава ВЖМ4 с газодиффузионным защитным покрытием //МиТОМ. 2011. №3. С. 28–32.
3. Космин А.А., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Булавинцева Е.Е. Жаростойкое покрытие для нового перспективного интерметаллидного сплава ВИНЗ //Сварочное производство. 2013. №6. С. 35–37.
4. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 26–37.

5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Ионное травление и модифицирование поверхности ответственных деталей машин в вакуумно-дуговой плазме //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 149–163.
7. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Конверсия в машиностроении. 1999. №2. С. 42–47.
8. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //МиТОМ. 1995. №2. С. 15–18.
9. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
10. Матвеев П.В., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Защитные жаростойкие покрытия для сплавов на основе интерметаллидов никеля //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 12–15.
11. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Разработка ионно-плазменных жаростойких металлических слоев теплозащитных покрытий для охлаждаемых рабочих лопаток турбин //МиТОМ. 2013. №11. С. 16–21.
12. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Степанова С.В. Ионно-плазменные жаростойкие покрытия с композиционным барьерным слоем для защиты от окисления сплава ЖС36-ВИ //МиТОМ. 2011. №1. С. 34–40.
13. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Металлы. 2007. №5. С. 23–34.
14. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутенийсодержащего сплава марки ВЖМ4 //Труды ВИАМ. 2014. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
15. Будиновский С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминидных покрытий //Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №3. С. 3–11.
16. 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.
17. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.

18. Tsipas Sofia. Thermophysical properties of Plasma Sprayed thermal Barrier Coatings. University of Cambridge. 2005. P. 1–25.
19. Levi C.G. Emerging materials and processes for thermal barrier systems //Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2004. №8. P. 77–91.
20. Clarke D.R., Phillpot S.R. Thermal barrier coating materials //Materialstoday. 2005. V. 8. №6. P. 22–29.
21. Narottam P. Bansal, Dongming Zhu, Maryam Eslamloo-Grami. Effects of Doping on Thermal Conductivity of Pyrochlore Oxides for Advanced Thermal Barrier Coatings, NASA/TM–2006-214483.
22. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
23. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
24. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 3–8.

REFERENCES LIST

1. Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Gajamov A.M. Sovremennoe sostojanie i osnovnye tendencii razvitija vysokotemperaturnyh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD [Current state and the main tendencies of development of high-temperature heat-protective coverings for working blades of turbines of aviation GTD] //Aviacionnaja promyshlennost'. 2008. №4. S. 33–37.
2. Kuznecov V.P., Lesnikov V.P., Konakova I.P. i dr. Struktura i fazovyj sostav monokristallicheskogo splava VZhM4 s gazocirkuljacionnym zashhitnym pokrytiem [Structure and phase composition of VZhM4 single-crystal alloy with gazotsirkulyatsionny protecting cover] //MiTOM. 2011. №3. S. 28–32.
3. Kos'min A.A., Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Bulavinceva E.E. Zharostojkoe pokrytie dlja novogo perspektivnogo intermetallidnogo splava VIN3 [Heat resisting covering for new perspective intermetallidny alloy of VIN3] //Svarochnoe proizvodstvo. 2013. №6. S. 35–37.
4. Budinovskij S.A., Kablov E.N., Mubojadzhan S.A. Primenenie analiticheskoj modeli opredelenija uprugih naprjazhenij v mnogoslojnoj sisteme pri reshenii zadach po sozdaniju vysokotemperaturnyh zharostojkih pokrytij dlja rabochih lopatok aviacionnyh turbin [Application of analytical model of determination of elastic stresses in multi-layer system at the solution of tasks on creation of high-temperature heat resisting coverings for working blades of aviation turbines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 26–37.

5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokotepлонagruzhennyh de-talej gazoturbinnyyh dvigatelej [Materials for the high-heatloaded details of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
6. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Ionnoe travlenie i modificirovanie poverhnosti otvet-stvennyh detalej mashin v vakuumno-dugovoj plazme [Ion etching and modifying of surface of responsible details of machines in vacuum and arc plasma] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 149–163.
7. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Pomelov Ja.A. Ionno-plazmennyye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnyyh dvigatelej [Ion-plasma protecting covers for blades of gas turbine engines] //Konversija v mashinostroenii. 1999. №2. S. 42–47.
8. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys//MiTOM. 1995. №2. S. 15–18.
9. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i budushhih vysokih tehnologij [Rare metals and rare earth elements – materials of modern and future high technologies] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
10. Matveev P.V., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Kos'min A.A. Zashhitnye zharostojkie pokrytija dlja splavov na osnove intermetallidov nikelja [Protective heat resisting coverings for alloys on the basis of nickel intermetallic compound] //Aviacionnyye materialy i tehnologii. 2013. №2. S. 12–15.
11. Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Gajamov A.M., Matveev P.V. Razrabotka ionno-plazmennyyh zharostojkih metallicheskih sloev teplozashhitnyh pokrytij dlja ohlazhdaemyh rabochih lopatok turbin [Development of ion-plasma heat resisting metal layers of heat-protective coverings for cooled working blades of turbines] //MiTOM. 2013. №11. S. 16–21.
12. Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Gajamov A.M., Stepanova S.V. Ionno-plazmennyye zharostojkie pokrytija s kompozicionnym bar'ernym sloem dlja zashhity ot okislenija splava ZhS36-VI [Ion-plasma heat resisting coverings with composition barrier layer for protection against oxidation of alloy ZhS36-VI] //MiTOM. 2011. №1. S. 34–40.
13. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Lucenko A.N. Ionno-plazmennyye zashhitnye pokrytija dlja lopatok gazoturbinnyyh dvigatelej [Ion-plasma protecting covers for blades of gas turbine engines] //Metally. 2007. №5. S. 23–34.
14. Gajamov A.M., Budinovskij S.A., Mubojadzhjan S.A., Kos'min A.A. Vybor zharostojkogo pokrytija dlja zharoprochnogo nikel'evogo renij-rutenijsoderzhashhego splava marki VZhM4 [Choice of heat resisting covering for heat resisting nickel renij-rutenijsoderzhashchy alloy of the VZhM4 brand] //Trudy VIAM. 2014. №1. St. 01 (viam-works.ru).
15. Budinovskij S.A. Primenenie analiticheskoj modeli opredelenija uprugih mehanicheskikh i termicheskikh naprjazhenij v mnogoslojnoj sisteme v reshenii zadach po sozdaniju zharostojkih aljuminidnyh pokrytij [Application of analytical model of determination of elastic mechanical and thermal

- stresses in multi-layer system in the solution of tasks on creation of heat resisting aluminidny coverings] //Uprochnjajushhie tehnologii i pokrytija. 2013. №3. S. 3–11.
16. Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Matveev P.V. Vysokotemperaturnye zharostojkie pokrytija i zharostojkie sloi dlja teplozashhitnyh pokrytij [High-temperature heat resisting coverings and heat resisting layers for heat-protective coverings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 17–20.
 17. Chubarov D.A., Matveev P.V. Nove keramicheskie materialy dlja teplozashhitnyh pokrytij rabochih lopatok GTD [New ceramic materials for heat-protective coverings of working blades of GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 43–46.
 18. Tspas Sofia. Thermophysical properties of Plasma Sprayed thermal Barrier Coatings. University of Cambridge. 2005. P. 1–25.
 19. Levi C.G. Emerging materials and processes for thermal barrier systems //Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2004. №8. P. 77–91.
 20. Clarke D.R., Phillpot S.R. Thermal barrier coating materials //Materialstoday. 2005. V. 8. №6. P. 22–29.
 21. Narottam P. Bansal, Dongming Zhu, Maryam Eslamloo-Grami. Effects of Doping on Thermal Conductivity of Pyrochlore Oxides for Advanced Thermal Barrier Coatings, NASA/TM–2006-214483.
 22. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat-protective coverings for turbine blades of high pressure of perspective GTD] //Metally. 2012. №1. S. 5–13.
 23. Kablov E.N., Mubojadzhjan S.A. Zharostojkie i teplozashhitnye pokrytija dlja lopatok turbiny vysokogo davlenija perspektivnyh GTD [Heat resisting and heat-protective coverings for turbine blades of high pressure of perspective GTD] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 60–70.
 24. Mubojadzhjan S.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Smirnov A.A. Poluchenie keramicheskikh teplozashhitnyh pokrytij dlja rabochih lopatok turbin aviacionnyh GTD magnetronnym metodom [Receiving ceramic heat-protective coatings for working blades of turbines of aviation GTD magnetronny method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 3–8.