

ТЕППОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Андрей Николаевич АКСЕНОВ¹

УДК 621.793.16

ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ МО-CVD РЕАКТОРА ДЛЯ ТЕРМОБАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ ТУРБИНЫ¹

¹ кандидат физико-математических наук,
начальник лаборатории, ПАО «Тюменские моторостроители»
9123975423@mail.ru

Аннотация

В данной статье анализируются данные исследований по термобарьерным покрытиям, полученные методом химического осаждения из паровой фазы. Рассматриваются скорости роста слоев, конструкции реакторов, микроструктуры и свойства керамических покрытий. Основное внимание уделяется методам исследования и результатам, полученным с применением металлоорганических прекурсоров. Термобарьерное покрытие рабочих лопаток методом химического осаждения из газовой фазы может быть более эффективным решением, чем традиционные подходы, связанные с электронно-лучевыми или плазменными процессами. Микроструктура, механические и теплофизические свойства таких покрытий сопоставимы с серийными конденсационными слоями. При использовании β -дикетонатов (дипивалоилметанатов) циркония и иттрия в качестве прекурсоров совершенная структура кристаллитов может формироваться

¹ Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-19-10325).

Цитирование: Аксенов А. Н. Эскизный проект МО-CVD реактора для термобарьерного покрытия турбины / А. Н. Аксенов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 4. С. 10-24.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-10-24

со скоростью более 20-50 мкм/ч и ограничивается, главным образом, конструкцией сублиматоров. Представлено краткое описание экспериментального реактора для покрытия лопатки турбины.

Ключевые слова

Керамические термобарьерные покрытия, химическое осаждение из паровой фазы, столбчатая микроструктура, скорости роста.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-10-24

Одним из важнейших моментов современных высокотемпературных газовых турбин является термобарьерное покрытие (ТБП), позволяющее получить значительное преимущество в ресурсе (до 2-4 раз) или эффективности [5; 11; 12]. Покрытие трастовой поверхности турбины материалами на основе оксида циркония при характерных толщинах $\delta \sim 100-200$ мкм и коэффициентах теплопроводности $\lambda \sim 1-2,5$ Вт·м/К обеспечивает повышение предельной температуры термодинамического цикла более чем на 100-150 °С, а также уменьшает опасные градиенты напряжений в лопатке [2; 7].

Технологические процессы ТБП на большинстве отечественных и зарубежных предприятий сводятся к плазменному APS (Atmospheric Plasma Spray) и электронно-лучевому EB-PVD (Electron Beam-Physical Vapor Deposition) напылению. Указанные подходы имеют свои преимущества и недостатки. Например, у APS покрытий более низкий коэффициент теплопроводности, но недостаточные механические свойства. Процессы EB-PVD [13; 17] заметно повышают стойкость ТБП к термоциклическим нагрузкам (за счет столбчатой структуры), но требуют содержания большой и весьма затратной инфраструктуры. В целом отмечается крайняя неудовлетворенность современными серийными способами ТБП. Было предложено множество подходов [15], в которых предпринимались разные попытки улучшить существующее положение дел (главным образом для плазменного напыления) путем впрыска в плазменную струю суспензий наноматериалов, прекурсоров, создания контролируемой атмосферы с низким давлением, но все эти методы не позволяют получить качественного и эффективного решения удобного для серийного производства.

Особое место в методах формирования ТБП на лопатках турбины занимают работы ВИАМ [4], в которых предлагается реактивное магнетронное распыление (РМР) металлических мишеней из сплава Zr-Y-Gd и плазмохимический синтез оксидов при подаче кислорода [1]. РМР выгодно отличается от EB-PVD существенным снижением энергопотребления, уменьшением массы и габаритов оборудования.

По установленным представлениям керамические слои с высокими механическими свойствами могут быть получены только при конденсации столбчатых структур из паровой фазы [19]. Обычно это достигается прямым физическим испарением материалов покрытия (плазмой или электронным лучом). Адгезионная прочность при этом сильно зависит от состава соединительного жаро-

стойкого слоя и определяется прочностью оксидной пленки TGO (Thermally Grown Oxide), формируемой в процессе покрытия, а также при эксплуатации из-за естественной проницаемости (по кислороду) материала и микроструктуры ТБП. Проблема металлических жаростойких слоев весьма обширна и является предметом особого изучения. Непосредственно в данной работе можно только отметить, что большинство соединительных покрытий в Российской Федерации разработаны ВИАМ, а наиболее совершенные решения включают в себя сплавы СДП-41 (NiCrAlTaReYHf), ВСДП-4 (NiAlCrHf) и ВСДП-3 (NiCrAlReYHf) с внешним алюминидным слоем ВСДП-16 (AlNiY) [8].

Металл может быть переведен в паровую фазу не только при прямом испарении, но и при термическом разложении соответствующего исходного вещества (прекурсора) [9]. В качестве прекурсоров обычно выступают летучие карбониды, галогениды, гидриды или металлоорганические соединения (алкоголяты, β -дикетонаты). Процессы разложения производятся в специальных установках (реакторах) с контролируемой атмосферой. Относительно температуры обрабатываемой детали реакторы могут быть с «горячими» или «холодными» стенками. В первом случае требуемая температура подложки достигается в печи с общим нагревом, во втором — при использовании лазерного излучения или индукционного поля. Реакторы с «холодными» стенками сложнее конструктивно и дороже в изготовлении, но они не допускают значительного разложения паров исходного вещества в газовой фазе, а также на стенках реакционной камеры, что делает процесс более экономичным и совершенным. По сравнению с PVD, методы CVD (Chemical Vapor Deposition) реализуются на относительно простом оборудовании и не требуют высокого вакуума (рабочее давление 10^2 - 10^5 Па). При подаче кислорода в реакционную зону CVD установки возможно формирование оксидных пленок с управляемой микроструктурой (в т. ч. столбчатой), что уже находит промышленное применение при производстве электронных компонентов, топливных элементов, сенсоров и покрытий различного функционального назначения (оптических, биосовместимых, упрочняющих). Но в турбомашиностроении практически все технологические решения по CVD сводятся к галогенидам алюминия для получения жаростойких диффузионных покрытий на основе β (NiAl) [3; 10]. Несомненно, это важный класс покрытия. Более того, при микролегировании указанного интерметаллида Pt, Zr, Hf или Ir возможен качественный рост жаростойкости до уровня, сопоставимого с традиционными системами NiCrAlY [14; 20]. Но значительно больший экономический и технологический эффект следует ожидать от термобарьерных CVD-покрытий.

При химическом осаждении керамических слоев из паровой фазы наиболее часто используются β -дикетонаты металлов [6], имеющие в своем составе связь кислород-металл, являющуюся основой для образования оксидов при термоллизе. Кроме этого, данные соединения отличаются высокой летучестью при сравнительно низких температурах (100-250 °С), не токсичны, имеют длительный срок хранения при нормальных условиях, стабильно и воспроизводимо переходят в газовую фазу без разложения, не реагируют с конструкционными

материалами реакторов. Простейшим β -дикетоном является ацетилацетон, но наиболее часто на практике используются дипивалоилметанаты (thd). Физические свойства $Zr(thd)_4$ и $Y(thd)_3$ приведены в таблице 1 [22].

В техническом университете Брауншвейга (Германия) исследование методов CVD для термобарьерных покрытий проводилось на лабораторном (lab-scale) и промышленном (industrial-scale) реакторах с «горячими» стенками [18]. В качестве основы lab-scale реактора была использована трехзонная трубчатая печь $\varnothing 84 \times 1\,000$ с максимальной температурой 1 000 °С. Сублимация прекурсоров происходила в отдельно нагреваемых трубах ($\varnothing 40$, $\varnothing 24$ — для $Zr(thd)_4$ и $Y(thd)_3$ соответственно) с максимальной загрузкой тиглей 30 г $Zr(thd)_4$ и 5 г $Y(thd)_3$. Транспорт паров в рабочую зону реактора производился потоком аргона с массовым контролем расхода. В качестве образцов использовались шайбы $\varnothing 25 \times 3$ из сплава GTD111 с жаростойким покрытием PtAl (66 мкм) или MCrAlY (100 мкм). Было показано, что ТБП с наилучшими свойствами формируется при температурах поверхности 1 023-1 123 К и молярной концентрации прекурсоров $\leq 6 \cdot 10^{-3}$. Для получения стандартного материала ZrO_2 -(6-8%) Y_2O_3 (8YSZ) отношение массовых расходов $Zr(thd)_4/Y(thd)_3$ должно быть $\sim 15,3$. Качественные оксидные слои, аналогичные по микроструктуре EB-PVD, могут образовываться и при значительном отклонении расхода кислорода от условий стехиометрического горения реактивов (полное сжигание лигандов не является обязательным условием). Коэффициент использования материалов не превышал 8,5%, а типичная скорость роста составляла 20-30 мкм/ч (при использовании сублиматора специальной конструкции).

Industrial-scale реактор (рис. 1) был спроектирован Archer Technicoat LTD (Англия) в кооперации с SIFCO (Ирландия) для осаждения покрытий типа TiC или Al_2O_3 . Реактор основан на колпаковой печи и включает в себя реторту, испарители прекурсоров, системы охлаждения и вакуумирования. Подача пара организовывалась через отдельно подогреваемые трубы с внутренним диаметром 50 мм. Для исключения конденсации прекурсоров в транспортных линиях, температура стенок паропровода превышала температуру сублимации реактивов на 20 °С. Конструкция испарителей была основана на серийном дисковом порошковом дозаторе Praxair.

Таблица 1

Свойства дипивалоилметанатов циркония и иттрия

Table 1

The qualities of zirconium and yttrium dipivaloylmethanates

Параметр или условия	$Zr(thd)_4$	$Y(thd)_3$
молекулярная формула	$C_{44}H_{76}O_8Zr$	$C_{33}H_{57}O_6Y$
молярная масса [г/моль]	824,3	638,72
температура плавления [К]	591-593	442-445
условия сублимации	453 К; 13 Па	368 К; 7 Па

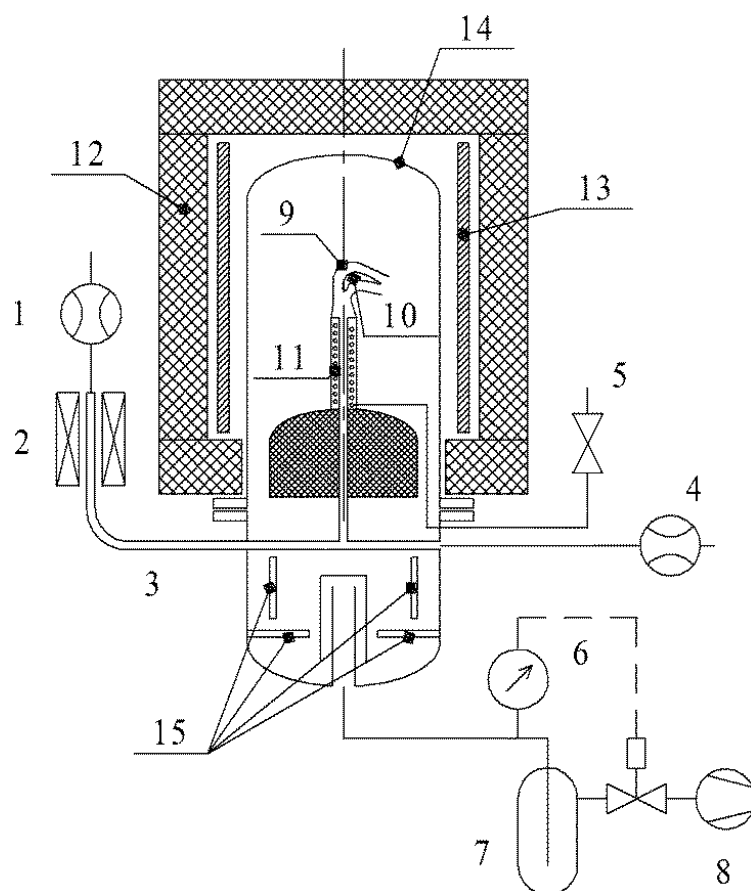


Рис. 1. Опытно-промышленный CVD реактор для покрытия пера турбинной лопатки: 1 — контроллер массового расхода транспортирующего газа; 2 — испаритель прекурсоров; 3 — подогреваемый паропровод; 4 — контроллер массового расхода реактивного кислорода; 5 — линия подачи сжатого воздуха для охлаждения паропровода (11) внутри печи; 6 — автоматическая система регулирования давления в рабочей зоне реактора; 7 — водоохлаждаемая ловушка; 8 — вакуумный насос; 9 — дефлектор; 10 — сегмент турбинной лопатки; 12 — колпаковая электропечь; 13 — нагревающие элементы; 14 — реторта $\varnothing 400 \times 830$; 15 — водоохлаждаемые секции

Fig. 1. Experimental-industrial CVD reactor for coating turbine blade pen: 1 — mass flow controller of the transport gas; 2 — evaporator precursors; 3 — heated steam pipe; 4 — mass flow controller reactive oxygen; 5 — the compressed air supply line for the cooling steam conduit (11) within the furnace; 6 — automatic pressure control system in the working zone of the reactor; 7 — water-cooled trap; 8 — vacuum pump; 9 — deflector; 10 — segment turbine blade; 12 — bell-electric; 13 — heating elements; 14 — retort $\varnothing 400 \times 830$; 15 — water-cooled section

Термобарьерное покрытие формировалось на реальном сегменте пера рабочей лопатки турбины с площадью поверхности 18,75 см². Для организации потока пара вокруг обрабатываемого образца с зазором 10-15 мм устанавливался специальный дефлектор. Направление течения пара — от входной кромки к выходной. Основные параметры режима покрытия приведены в таблице 2.

При сравнительных термоциклических испытаниях EB-PVD и МО-CVD покрытий получена стойкость 1 000 и 772 цикла соответственно (нагрев 1 423 К, выдержка 45 минут, охлаждение до 373 К). В соответствии с ISO 14188 критерием разрушения являлось скалывание/отслоение 30% покрытой поверхности пера.

Более совершенные свойства МО-CVD покрытий были получены в Институте исследования материалов (о. Хонсю, Тохоку, Япония) [16; 23] на реакторе с холодными стенками. Нагрев образцов (шайба $\varnothing 10 \times 1$ из сплава Hastelloy-XR) производился с помощью лазерного излучения мощностью до 250 Вт. При температурах подложки более 1 070 К были зафиксированы скорости роста более 230 мкм/ч. В отдельных случаях термобарьерное покрытие формировалось со скоростью 660 мкм/час, но структура кристаллитов была коническая. При термоциклических испытаниях покрытия 4YSZ по режиму 600-1 373 К и выдержке 600 с контрольный образец без разрушения выдерживал 1 200 циклов (далее происходило отслоение по TGO).

В Институте неорганической химии им. А. В. Николаева (ИНХ СО РАН) процесс осаждения слоя YSZ проводился при температуре подложки (кварцевая пластина) 650 °С и давлении в реакторе $\sim 10^3$ Па. Температуры испарителей прекурсоров поддерживались на уровне 175-180 °С для $Zr(thd)_4$ и 125-130 °С для $Y(thd)_3$. Расходы газа-носителя (Ar) и кислорода (O₂) составляли 2,5 и 9 л/ч соответственно. Типичная скорость роста 2,5 мкм/ч (микроструктура получаемых покрытий приведена на рис. 2).

Таблица 2

Параметры процесса покрытия сегмента пера лопатки [18]

Table 2

Pen blade segment coating process parameters [11]

Параметр	Величина
полное давление в рабочей зоне	500 Па
температура покрываемой поверхности	1 073 К
суммарный расход рабочих газов	0,359 моль/мин
молярная концентрация реактивного кислорода	0,373
молярная концентрация прекурсоров	0,0067
время осаждения ТБП	240 мин
число Рейнольдса Re	388
толщина покрытия на входной кромке	55 мкм

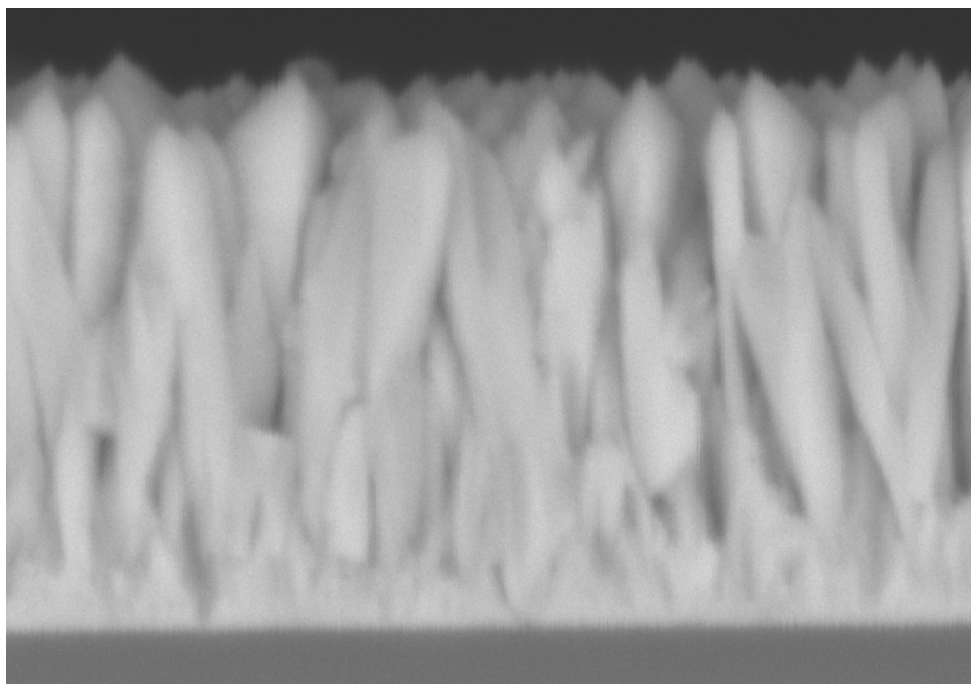


Рис. 2. Микроструктура MOCVD YSZ (до 20 мкм), полученная в ИНХ СО РАН (Н. Б. Морозова, И. К. Игуменов, 2015 г.)

Fig. 2. MOCVD YSZ Microstructure (up to 20 microns), obtained in NIIC SB RAS (N. B. Morozova, I. K. Igumenov, 2015)

Анализ опубликованных данных по скоростям роста (таблица 3) показывает, что керамическое MO-CVD покрытие со столбчатой структурой (аналогичной EB-PVD) вполне реально формировать на скоростях не менее 20 мкм/ч, что вполне достаточно для мелкосерийного производства. Наиболее совершенная кристаллическая структура покрытия достигается при использовании $Zr(thd)_4$ - $Y(thd)_3$ и реакторов с холодными стенками.

Главным ограничителем скорости роста при MO-CVD процессах является способ сублимации прекурсоров. Простейшие подходы, связанные с общим нагревом массы порошковых реактивов, для достаточной производительности требуют значительного количества дорогостоящих прекурсоров и большой площади свободной поверхности. Более эффективны системы, в которых происходит быстрое и полное испарение отдельных частиц или капель. Например, в работах Национальной лаборатории Ок-Ридж (США) [25] подача прекурсоров в реактор производится путем ультразвукового распыления раствора $Zr(thd)_4$ и $Y(thd)_3$ в тетрагидрофуране. Принципиальная схема сублиматора Технического университета Брауншвейга приведена на рис. 3, в которой щеточно-поршневой механизм подачи порошка вполне успешно заменяется дисковым порошковым дозатором от установок APS.

Таблица 3

Обзор литературных данных по покрытию YSZ методом CVD

Table 3

The summary of the literature data on YSZ coating with CVD

Прекурсоры	Температура подложки [K]	Скорость роста покрытия [мкм/ч]	Фазовый состав	Тип реактора	Источник
Zr(thd) ₄ , Y(thd) ₃	700-1 200	20-50	T	ГС	[18; 26]
	873-1 173	100	T	XC	[23]
	1 025	230	C	XC	[16]
ZrCl ₄ , Y(thd) ₃	973-1 173	100	T	XC	[21]
Zr(OBut ⁿ) ₄ , Y(OBut ⁿ) ₃	1 223-1 278	43	M, T, C	XC	[24]

Примечания: М, Т, К — моноклинная, тетрагональная и кубическая модификации; ГС, ХС — горячие и холодные стенки соответственно

Notes: M, T, K — monoclinic, tetragonal and cubic modifications; ГС, ХС — hot and cold walls, respectively

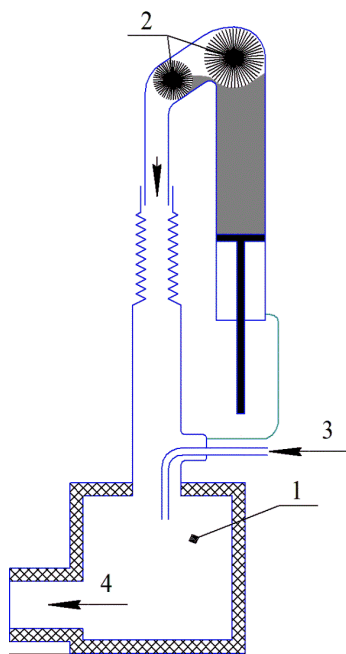


Рис. 3. Устройство сублиматора со щеточно-поршневым механизмом: 1 — камера сублимации (Т~573 К); 2 — щеточный механизм для перемещения порошков прекурсоров; 3 — подача транспортирующего аргона; 4 — выход паров из испарителя

Fig. 3. The sublimator design with brush-piston mechanism: 1 — sublimation chamber (T~573 K); 2 — brush mechanism for moving the precursor powders; 3 — conveying argon feed; 4 — vapor output from the evaporator

Для покрытия опытных турбинных лопаток в АО «Тюменские моторостроители» совместно с ИНХ СО РАН был спроектирован экспериментальный МО-CVD реактор (рис. 4).

Основа реактора — кварцевая труба $\varnothing 120$. Из кварца также выполнены форсунки подачи пара, реактивного кислорода и трубы для откачки продуктов реакции. Нагрев обрабатываемой лопатки производится индукционно (частота преобразователя — 2,4-10 кГц, максимальная мощность — 40 кВт) с обратной связью по сигналу пирометра. Используется термостатирование (250-320 °С) рабочей зоны и паропроводов, предотвращающее конденсацию прекурсоров на стенках реактора. Равномерность покрытия достигается вращением лопатки с угловой скоростью до 60 об/мин. Загрузка новой лопатки в реактор осуществляется через специальный модуль. Системы подачи газов (реактивных и транспортирующих) включают в себя контроллеры массовых расходов и терморезисторные датчики вакуума. Рабочее давление в реакционной камере создается золотниковым вакуумным насосом типа АВЗ-20Д. Макет сублиматора выполнен в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе (ИТ СО РАН) и основан на вихревом течении транспортирующего газа (аргона) с инжекцией порошков

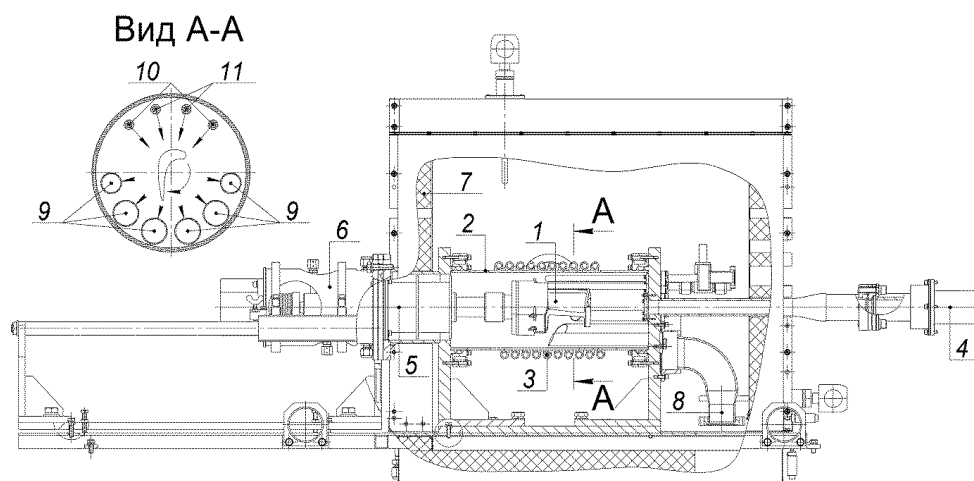


Рис. 4. Эскиз экспериментального МО-CVD реактора:

- 1 — обрабатываемая лопатка;
- 2 — кварцевая труба ($\varnothing 120$);
- 3 — индуктор; 4 — пирометр;
- 5 — модуль загрузки лопатки;
- 6 — узел ввода вращения в вакуум;
- 7 — стенка термостата;
- 8 — подвод к вакуумному насосу;
- 9 — трубы откачки продуктов реакции;
- 10 — форсунки подачи реактивного кислорода; 11 — форсунки подачи пара

Fig. 4. Sketch of the experimental MO-CVD reactor:

- 1 — handled blade;
- 2 — quartz tube ($\varnothing 120$);
- 3 — inductor; 4 — pyrometer;
- 5 — blade loading module;
- 6 — rotation input node into the vacuum; 7 — thermostat wall;
- 8 — vacuum pump supply;
- 9 — reaction products pumping pipes;
- 10 — reactive oxygen supply nozzles; 11 — steam supply nozzles

прекурсоров в псевдооживленный слой инертных частиц (проходит испытания, схема макета приведена на рис. 5).

Несмотря на то, что сконструированный реактор носит экспериментальный характер, при положительных результатах НИОКР вполне возможно опытное покрытие лопаток для мелкосерийного производства с расчетной производительностью до 10 лопаток в сутки. Благодаря повсеместному использованию отечественных комплектующих стоимость всего проекта сопоставима с затратами на технологический процесс EB-PVD покрытия одного или двух комплектов лопаток. Кроме этого, возможно сложное градиентное легирование керамического покрытия другими лантаноидами для специфических задач повышения максимальной температуры эксплуатации керамики, более низкого коэффициента теплопроводности, или обеспечения длительной работоспособности газотурбинного двигателя в условиях лесса.

Выводы

1. Обзор опубликованных данных по формированию МО-CVD покрытий типа $ZrO_2-Y_2O_3$ показал, что их свойства (микроструктура, термоциклическая

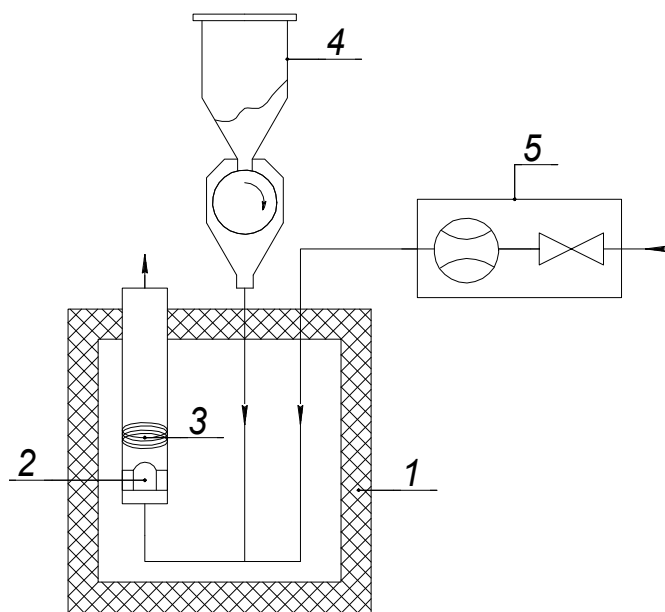


Рис. 5. Схема вихревого сублиматора:

- 1 – термостат ($T \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$);
- 2 – завихритель;
- 3 – циклон с частицами корунда;
- 4 – порошковый дозатор прекурсоров;
- 5 – контроллер массового расхода транспортирующего газа

Fig. 5. Vortex sublimator scheme:

- 1 — thermostat ($T \sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$);
- 2 — swirler;
- 3 — cyclone with particles of corundum;
- 4 — precursors powder dispenser;
- 5 — carrier gas mass flow controller

стойкость, адгезия и т. п.) могут быть вполне сопоставимы с серийными электронно-лучевыми покрытиями.

2. Реализация скоростей роста более 20-50 мкм/ч требует создания специальных сублиматоров, в которых должно происходить практически мгновенное испарение отдельных частиц прекурсоров.

3. Выполнен проект экспериментального реактора для покрытия лопаток методом химического парофазного осаждения с расчетной производительностью до 10 лопаток в сутки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин Е. В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. М.: Техносфера, 2014. 256 с.
2. Каблов Е. Н. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян // *Металлы*. 2012. № 1. С. 5-13.
3. Коломыцев П. Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов / П. Т. Коломыцев. М.: Металлургия, 1991. 237 с.
4. Мубояджян С. А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом / С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. М. Гаямов, А. А. Смирнов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 4. С. 3-8.
5. Нагога Г. П. Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин: Учебное пособие / Г. П. Нагога. М.: Изд-во МАИ, 1996. 100 с.
6. Пешкова В. М. β -Дикетоны / В. М. Пешкова, Н. В. Мельчакова. М.: Наука, 1986. 200 с.
7. Придорожный Р. П. Расчетная оценка эффективности применения теплозащитных покрытий на охлаждаемых рабочих лопатках турбин высокого давления авиационных газотурбинных двигателей / Р. П. Придорожный, А. В. Шереметьев, А. П. Зиньковский // *Вестник двигателестроения*. 2014. № 1. С. 52-56.
8. Смирнов А. А. Повышение жаростойкости конденсационно-диффузионных покрытий для лопаток турбин из сплава ЖС32 / А. А. Смирнов, С. А. Будиновский // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 2. С. 3-10.
9. Сыркин В. Г. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение / В. Г. Сыркин. М.: Наука, 2000. 495 с.
10. Тамарин Ю. А. Жаростойкие диффузионные покрытия лопаток газотурбинных двигателей / Ю. А. Тамарин; под ред. чл-кор. АН СССР А. Т. Туманова. М.: Машиностроение, 1978. 136 с.
11. Тихонов А. С. Проектирование установки для термоциклических испытаний комплексных многослойных теплозащитных покрытий лопаток газовых турбин / А. С. Тихонов, С. И. Сендюрев, В. Т. Хайрулин // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2014. № 38. С. 61-71.
12. Харьковский С. В. Сравнение наиболее распространенных схем охлаждения рабочих лопаток высокотемпературных турбин высокого давления / С. В. Харьковский, В. П. Почуев, В. С. Кинзбургский, А. А. Мухин //

- Высокотемпературные газовые турбины / под ред. М. Я. Иванова. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. С. 171-190 (Труды ЦИАМ № 1342).
13. Яковчук К. Ю. Теплопроводность и термоциклическая долговечность конденсационных термобарьерных покрытий / К. Ю. Яковчук // Современная электрометаллургия. 2014. № 4. С. 25-31.
 14. Brammer T. M. Improving the Phase Stability and Oxidation Resistance of β -NiAl / T. M. Brammer. Ames, Iowa: UNT Digital Library, 2011. 90 pp.
 15. Fauchais P. L. Thermal Spray Fundamentals / P. L. Fauchais, J. V. R. Heberlein, M. L. Boulos. New York: Springer US Publ., 2014. 1566 pp. DOI: 10.1007/978-0-387-68991-3.
 16. Kimura T. Rapid Synthesis of Yttria-Stabilized Zirconia Films by Laser Chemical Vapor Deposition / T. Kimura, T. Goto // Materials Transactions. 2003. Vol. 44. No 3. Pp. 421-424.
 17. Movchan B. A. High-Temperature Protective Coatings Produced by EB-PVD / B. A. Movchan, K. Yu. Yakovchuk // Journal of Coating Science and Technology. 2014. Vol. 1. Pp. 96-110.
 18. Nemetz W. Chemical Vapour Deposition of Thermal Barrier Coatings on Turbine Blades / W. Nemetz. Zugl. Braunschweig, Techn. Univ., Diss. 2004. 125 pp.
 19. Nicholls J. R. Low Thermal Conductivity EB-PVD Thermal Barrier Coatings. High Temperature Corrosion 5 / J. R. Nicholls, K. J. Lawson, A. Johnston, D. S. Rickerby; Edited by R. Streiff, I. J. Wright, R. Krutenat, M. Caillet, A. Cailerie. Trans Tech Publication, 2001. Pp. 595-606.
 20. Pint B. A. Substrate and Bond Coat Compositions: Factors Affecting Alumina Scale Adhesion / B. A. Pint, I. G. Wright, W. Y. Lee, Y. Zhang, K. Prüßner, K. B. Alexander // Materials Science and Engineering. 1998. A245. Pp. 201-211.
 21. Préauchtat B. Properties of PECVD-Deposited Thermal Barrier Coatings / B. Préauchtat, S. Drawin // Surface and Coatings Technology. 2001. Nos 142-144. Pp. 835-842.
 22. Pulver M. Chemische Gasphasenabscheidung von Zirkoniumdioxid, Yttriumoxid und Aluminiumoxid aus β -Diketonaten und Alkoholaten: Diss. / M. Pulver. TU Braunschweig. Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld, 2000.
 23. Tu R. Thermal Cycle Resistance of Yttria Stabilized Zirconia Coatings Prepared by MO-CVD / R. Tu, T. Goto // Materials Transactions. 2005. Vol. 46. No 6. Pp. 1318-1323.
 24. Varanasi V. G. High-Growth Rate YSZ Thermal Barrier Coatings Deposited by MOCVD Demonstrate High Thermal Cycling Lifetime / V. G. Varanasi, T. M. Besmann, E. A. Payzant, B. A. Pint, J. L. Lothian, T. J. Anderson // Materials Science and Engineering A. 2001. No 528. Pp. 978-985.
 25. Varanasi V. G. MOCVD of YSZ Coatings Using β -diketonate Precursors / V. G. Varanasi, T. M. Besmann, R. L. Hyde, E. A. Payzant, T. J. Anderson // Journal of Alloys and Compounds. 2009. No 470. Pp. 354-359.
 26. Wahl G. Chemical Vapour Deposition of TBC: An Alternative Process for Gas Turbine Components / G. Wahl, W. Nemetz, M. Giannozzi, S. Rushworth, D. Baxter, N. Archer, F. Cernuschi, N. Boyle // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. 2001. No 123. Pp. 520-524.

Andrei N. AKSYONOV¹

MO-CVD REACTOR DRAFT PROJECT FOR TURBINE THERMAL BARRIER COATING¹

¹ Cand. Sci. (Phys-Math.),
Laboratory Chief, Tyumenskie motorostroiteli
9123975423@mail.ru

Abstract

The article analyzes the research data on thermal barrier coating, obtained by the chemical vapor deposition method. The layers growth rate, reactor design, microstructures and ceramic coatings properties are observed. The paper focuses on research methods and the results obtained with the use of organometallic precursors. Thermal barrier coating of rotor blades by the chemical vapor deposition method may be a more effective solution than traditional approaches, associated with electron-beam or plasma processes. The microstructure, mechanical and thermal properties of these coatings are comparable with the serial condensation layers. When using zirconium and yttrium β -diketonates (dipivaloylmethanates) as precursors, a perfect crystallites structure can be formed at speed of more than 20-50 mkm/h and is limited mainly by the sublimators design. A brief description of the experimental reactor for coating turbine blades is provided.

Keywords

Ceramic thermal barrier coating, chemical vapor deposition, columnar microstructure growth rate.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-10-24

¹ The article describes the research supported by the Russian Science Foundation (grant no 16-19-10325).

Citation: Aksyonov A. N. 2016. "MO-CVD Reactor Draft Project for Turbine Thermal Barrier Coating". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 4, pp. 10-24.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-4-10-24

REFERENCES

1. Berlin E. V., Seydman L. A. 2014. Poluchenie tonkikh plenok reaktivnym magnetronnym raspyleniem [Obtaining Thin Films by Reactive Magnetron Sputtering]. Moscow: Tekhnosfera.
2. Brammer T. M. 2011. Improving the Phase Stability and Oxidation Resistance of β -NiAl. Ames, Iowa: UNT Digital Library.
3. Fauchais P. L., Heberlein J. V. R., Boulos M. L. 2014. Thermal Spray Fundamentals. New York: Springer US Publ. DOI: 10.1007/978-0-387-68991-3
4. Kablov E. N., Muboyadzhyan S. A. 2012. "Teplozashchitnye pokrytiya dlya lopatok turbiny vysokogo davleniya perspektivnykh GTD" [Thermal Barrier Coatings for High-Pressure Turbine Blades of the Prospective GTE]. *Metally*, no 1, pp. 5-13.
5. Kharkovskiy S. V., Pochuev V. P., Kinzburskiy V. S., Mukhin A. A. 2010. "Sravnenie naibolee rasprostranennykh skhem okhlazhdeniya rabochikh lopatok vysokotemperaturnykh turbin vysokogo davleniya" [The Comparison of the Most Common Schemes Cooling Turbine Rotor Blades of the High-Temperature High-Pressure]. In: Ivanov M. Ya. (ed.). 2010. *Vysokotemperaturnye gazovye turbiny*, pp. 171-190. Trudy TsIAM no 1342. Moscow: TORUS PRESS.
6. Kimura T., Goto T. 2003. "Rapid Synthesis of Yttria-Stabilized Zirconia Films by Laser Chemical Vapor Deposition". *Materials Transactions*, vol. 44, no 3, pp. 421-424.
7. Kolomytsev P. T. 1991. *Vysokotemperaturnye zashchitnye pokrytiya dlya nikelovykh splavov* [High Temperature Protective Coatings for Nickel Alloys]. Moscow: Metallurgiya.
8. Movchan B. A., Yakovchuk K. Yu. 2014. "High-Temperature Protective Coatings Produced by EB-PVD". *Journal of Coating Science and Technology*, vol. 1, pp. 96-110.
9. Muboyadzhyan S. A., Budinovskiy S. A., Gayamov A. M., Smirnov A. A. 2012. "Poluchenie keramicheskikh teplozashchitnykh pokrytiy dlya rabochikh lopatok turbin aviatsionnykh GTD magnetronnym metodom" [Production of Ceramic Thermal Barrier Coatings for Rotor Blades of GTE Magnetron Sputtering Turbines]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, no 4, pp. 3-8.
10. Nagoga G. P. 1996. *Effektivnye sposoby okhlazhdeniya lopatok vysokotemperaturnykh gazovykh turbin: Uchebnoe posobie* [Effective Ways of Cooling the High-Temperature Gas Turbines Blades: Textbook]. Moscow: Izd-vo MAI, 100 s.
11. Nemetz W. 2004. "Chemical Vapour Deposition of Thermal Barrier Coatings on Turbine Blades". Diss. Braunschweig, Techn. Univ.
12. Nicholls J. R., Lawson K. J., Johnston A., Rickerby D. S. 2001. *Low Thermal Conductivity EB-PVD Thermal Barrier Coatings. High Temperature Corrosion 5*. Edited by R. Streiff, I. J. Wright, R. Krutenat, M. Caillet, A. Cailerie, pp. 595-606. Trans Tech Publication.
13. Peshkova V. M., Mel'chakova N. V. 1986. β -Diketony [β -Diketones]. Moscow: Nauka.
14. Pint B. A., Wright I. G., Lee W. Y., Zhang Y., Pr ußner K., Alexander K. B. 1998. "Substrate and Bond Coat Compositions: Factors Affecting Alumina Scale Adhesion". *Materials Science and Engineering*, A245, pp. 201-211.
15. Pr auchat B., Drawin S. 2001. "Properties of PECVD-Deposited Thermal Barrier Coatings". *Surface and Coatings Technology*, nos 142-144, pp. 835-842.
16. Pridorozhnyy R. P., Sheremetyev A. V., Zin'kovskiy A. P. 2014. "Raschetnaya otsenka effektivnosti primeneniya teplozashchitnykh pokrytiy na okhlazhdaemykh rabochikh

- lopatkakh turbin vysokogo davleniya aviatsionnykh gazoturbinykh dvigateley” [The Estimated Efficiency of Thermal Barrier Coatings in the Cooled High Pressure Turbine Blades of Aircraft Turbine Engines]. Vestnik dvigatelestroeniya, no 1, pp. 52-56.
17. Pulver M. 2000. „Chemische Gasphasenabscheidung von Zirkoniumdioxid, Yttriumoxid und Aluminiumoxid aus β -Diketonaten und Alkoholaten“. Dissertation. TU Braunschweig. Papierflieger, Clausthal-Zellerfeld.
 18. Smirnov A. A., Budinovskiy S. A. 2016. “Povyshenie zharostoykosti kondensatsionno-diffuzionnykh pokrytiy dlya lopatok turbin iz splava ZhS32” [Increase Heat Resistance Condensation-Diffusion Coatings for Turbine Blades of the ZHS32 Alloy]. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii, no 2, pp. 3-10.
 19. Syrkin V. G. 2000. CVD-metod. Khimicheskoe parofaznoe osazhdenie [CVD-Method. Chemical Vapor Deposition]. Moscow: Nauka.
 20. Tamarin Yu. A. 1978. Zharostoykie diffuzionnye pokrytiya lopatok gazoturbinykh dvigateley [Heat-Resistant Diffusion Coating Gas Turbine Engine Blades]. Edited by A. T. Tumanov. Moscow: Mashinostroenie.
 21. Tikhonov A. S., Sendyurev S. I., Khayrulin V. T. 2014. “Proektirovanie ustanovki dlya termotsiklicheskikh ispytaniy kompleksnykh mnogosloynnykh teplozashchitnykh pokrytiy lopatok gazovykh turbin” [Designing Systems for Thermal Cycling Tests of Complex Multi-Layer Thermal Barrier Coatings of Gas Turbine Blades]. Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika, no 38, pp. 61-71.
 22. Tu R., Goto T. 2005. “Thermal Cycle Resistance of Yttria Stabilized Zirconia Coatings Prepared by MO-CVD”. Materials Transactions, vol. 46, no 6, pp. 1318-1323.
 23. Varanasi V. G., Besmann T. M., Hyde R. L., Payzant E. A., Anderson T. J. 2009. “MOCVD of YSZ Coatings Using β -diketonate Precursors”. Journal of Alloys and Compounds, no 470, pp. 354-359.
 24. Varanasi V. G., Besmann T. M., Payzant E. A., Pint B. A., Lothian J. L., Anderson T. J. 2001. “High-Growth Rate YSZ Thermal Barrier Coatings Deposited by MOCVD Demonstrate High Thermal Cycling Lifetime”. Materials Science and Engineering A, no 528, pp. 978-985.
 25. Wahl G., Nemetz W., Giannozzi M., Rushworth S., Baxter D., Archer N., Cernuschi F., Boyle N. 2001. “Chemical Vapour Deposition of TBC: An Alternative Process for Gas Turbine Components”. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, no 123, pp. 520-524.
 26. Yakovchuk K. Yu. 2014. “Teploprovodnost' i termotsiklicheskaya dolgovechnost' kondensatsionnykh termobar'ernykh pokrytiy” [Thermal Conductivity and Durability Thermocyclic Condensing Thermal Barrier Coatings]. Sovremennaya elektrometallurgiya, no 4, pp. 25-31.