

**СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ НАНЕСЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (обзор)**

Рассмотрены два метода нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия (ТЗП) на рабочие лопатки турбин, наиболее широко применяющиеся в настоящее время в серийных производствах газотурбинных двигателей (ГТД), – электронно-лучевое осаждение из паровой фазы (EB-PVD) и атмосферное плазменное напыление (APS). Приведены дальнейшие направления развития данных методов – электронно-лучевое направленное осаждение покрытий из паровой фазы (EB-DVD); получение ТЗП с вертикальными трещинами (DVC); нанесение покрытий с использованием прекурсоров, содержащих мелкодисперсные порошки керамик (SPPS). Рассмотрены новые способы нанесения ТЗП – плазменное физическое осаждение покрытий из паровой фазы (PS-PVD) и разрабатываемое в ВИАМ магнетронное среднечастотное распыление мишеней на основе сплавов циркония и гафния. Показаны различия в микроструктурах, типичные коэффициенты теплопроводности, эрозионная стойкость и термостойкость получаемых покрытий.

**Ключевые слова:** теплозащитное покрытие, YSZ, газотурбинный двигатель, EB-PVD, APS, PS-PVD, электронно-лучевое нанесение покрытий, плазменное напыление.

*The article describes two methods of deposition of a ceramic thermal barrier coating (TBC) on turbine blades, which are widely used in mass production of gas turbine engines (GTE) – electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) and atmospheric plasma spraying (APS). Further trends in development of these methods – electron beam directional vapor deposition (EB-DVD), production of TBC with directional vertical cracks (DVC), solution precursor plasma spraying (SPPS) are described as well. Some new processes for production of TBC such as plasma spraying physical vapor deposition (PS-PVD) and magnetron medium frequency sputtering of Zr- and Hf-based targets being under developing at VIAM are considered. Differences in microstructures, thermal conductivity, heat- and erosion resistance of the produced coatings are also discussed.*

**Keywords:** thermal barrier coating, YSZ, gas turbine engine, atmospheric plasma spraying (APS), electron beam physical vapor deposition (EB-PVD), plasma spraying physical vapor deposition (PS-PVD).

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации  
[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Аппарат рабочих лопаток газотурбинных двигателей подвергается воздействию интенсивных тепловых и механических нагрузок в условиях высокотемпературного коррозионного разрушения поверхности агрессивной внешней средой [1, 2]. В то же время необходимость повышения эффективности ГТД различного назначения влечет за собой увеличение рабочей температуры, которая ограничена температурой плавления жаропрочных сплавов на основе никеля [3–8]. Наиболее эффективным средством защиты 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 турбины [9–12].

В настоящее время в промышленности наиболее широко используются два метода нанесения керамических покрытий на металлические основы – электронно-лучевое осаждение из паровой фазы (EB-PVD) и атмосферное плазменное напыление (APS) [13–16].

Серийные ТЗП, нанесенные методом EB-PVD, с внешним керамическим слоем из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ), имеют характерную столбчатую структуру (рис. 1). Рост керамики в виде тонких кристаллитов, ориентированных по нормали к поверхности подложки, и наличие вертикальных каналов обеспечивают такому керамическому слою ТЗП, полученному электронно-лучевым методом, высокую термостойкость на поверхности металлической подложки в условиях интенсивных теплосмен, характерных при эксплуатации ГТД. Коэффициент теплопроводности ТЗП, нанесенного EB-PVD-методом, в исходном состоянии находится в диапазоне 1,5–1,8 Вт/(м·К), но в процессе эксплуатации ГТД возрастает до 2–2,4 Вт/(м·К), что связано со спеканием кристаллитов при высоких температурах и, соответственно, снижением пористости керамического слоя. В результате величина теплозащитного эффекта от применения ТЗП снижается с 80–100 до 20–40°C.

Серийные плазменные ТЗП по эксплуатационным свойствам (термостойкости, эрозионной

стойкости) уступают электронно-лучевым, так как не имеют столбчатой структуры (см. рис. 1). Вследствие быстрого увеличения микроструктурных дефектов в виде микротрещин, параллельных поверхности подложки, а также высокой шероховатости поверхности раздела «керамика–металл», ТЗП, нанесенные APS-методом, в целом имеют более короткие сроки службы, чем покрытия, полученные EB-PVD-методом. Однако более низкая удельная теплопроводность (0,5–1,4 Вт/(м·К)), универсальность, низкая стоимость оборудования и производства плазменных покрытий (в сравнении с электронно-лучевыми ТЗП) делают их коммерчески привлекательными для разработчиков и производителей ГТД.

В связи с этим плазменные (APS) ТЗП достаточно широко применяются для защиты деталей горячего тракта промышленных и энергетических газотурбинных установок, включая сопловые и рабочие лопатки турбин, благодаря пониженным рабочим температурам, температурным градиентам и меньшему количеству тепловых циклов [17].

Цель данной работы – анализ современного состояния разработок в области методов получения керамических слоев ТЗП как с точки зрения усовершенствования серийных технологий, так и разработки новых перспективных способов нанесения керамических покрытий.

Анализ научно-технической литературы в области ТЗП показывает, что исследования по совершенствованию EB-PVD-технологии нанесения керамических покрытий направлены на снижение теплопроводности путем модификации структуры покрытия в процессе осаждения за счет изменения параметров процесса, в том числе повышения давления в камере напыления, управления скоростью конденсации испаряемой керамики, применения прерывистого парового потока, вращения подложки с заданной скоростью для получения зигзагообразной структуры покрытия, чтобы обеспечить более эффективную термоизоляцию. Последние два подхода отражают важные изменения в понимании механизмов исчерпания защитных свойств ТЗП в процессе его эксплуатации. Столбчатая структура покрытий, нанесенных EB-PVD-методом, больше не рассматривается только как способ снятия касательных напряжений на границе «металл–керамика». В ряде работ показан значительный вклад двух- и трехмерных зигзагообразных EB-PVD-структур в снижение коэффициента удельной теплопроводности электронно-лучевого керамического слоя, который может быть снижен таким технологическим приемом – до 1 Вт/(м·К) [18].

Инновационный технологический подход к совершенствованию EB-PVD-технологии предполагает использование в процессе направленного в сторону подложки потока инертного газа. Метод получил название «электронно-лучевое направленное осаждение паров» (EB-DVD). Первооче-

редной задачей метода являлось повышение эффективности осаждения. Однако возможность манипулировать источником газа, введение в процесс нескольких источников газа или плазмы, а также (в перспективе) реактивное осаждение открыли новые возможности нанесения керамических слоев. Для испарения керамики применяют низковакуумное ( $10^{-3}$ – $10^{-4}$  мм рт. ст.) электронно-лучевое испарение в сочетании с направленным обдувом потоком гелия зоны испарения под определенным углом к покрываемой поверхности (рис. 2). Это позволяет получать керамический слой со столбчатой структурой, причем образующие его кристаллиты имеют волнообразную двухмерную или зигзагообразную трехмерную форму (рис. 3). Теплопроводность керамических покрытий (YSZ) с зигзагообразной микроструктурой, нанесенных DVD-методом, сопоставима с теплопроводностью плазменных ТЗП.

В области технологии плазменного напыления с использованием порошков наиболее значимыми являются два направления развития. Первое – получение ТЗП с вертикальными трещинами (DVC), в котором трещины, как и в EB-PVD-покрытиях, предназначены для релаксации касательных напряжений. Покрытие имеет более плотную микроструктуру и меньшую пористость, что приводит к росту удельной теплопроводности и улучшению сопротивления эрозии по сравнению с APS-покрытиями. При управлении параметрами процесса осаждения плотность DVC-покрытия может быть уменьшена вблизи поверхности слоя для облегчения полировки, необходимой для оптимизации аэродинамических параметров лопаток турбин. Эти свойства сделали DVC-технологию оптимальной для нанесения ТЗП на детали камеры сгорания, жаровых труб и сопла.

В последнее время предложена плазменная технология нанесения покрытия с использованием прекурсоров, содержащих мелкодисперсные порошки керамик (SPPS). Процесс состоит из последовательного быстрого испарения растворителя при впрыске прекурсора в плазменный факел на срезе плазмотрона, пиролиза в плазменной струе и кристаллизации на подложке (рис. 4). Теплопроводность SPPS-покрытий выше, чем у обычных плазменных (APS) покрытий (~1,4 Вт/(м·К)).

По мнению авторов SPPS-покрытия показывают лучшую термостойкость по сравнению с другими ТЗП, полученными известными методами. Термостойкость покрытий, нанесенных по технологиям APS, DVC, EB-PVD и SPPS, при температуре испытаний до 1121°C представлена на рис. 5.

Одним из наиболее перспективных методов нанесения ТЗП является разработанная компанией Sulzer Metco технология плазменного физического осаждения покрытий из паровой фазы (PS-PVD), которая является дальнейшим развитием технологии вакуумного плазменного напыления (LPSS) [6]. Первоначальной целью работ бы-

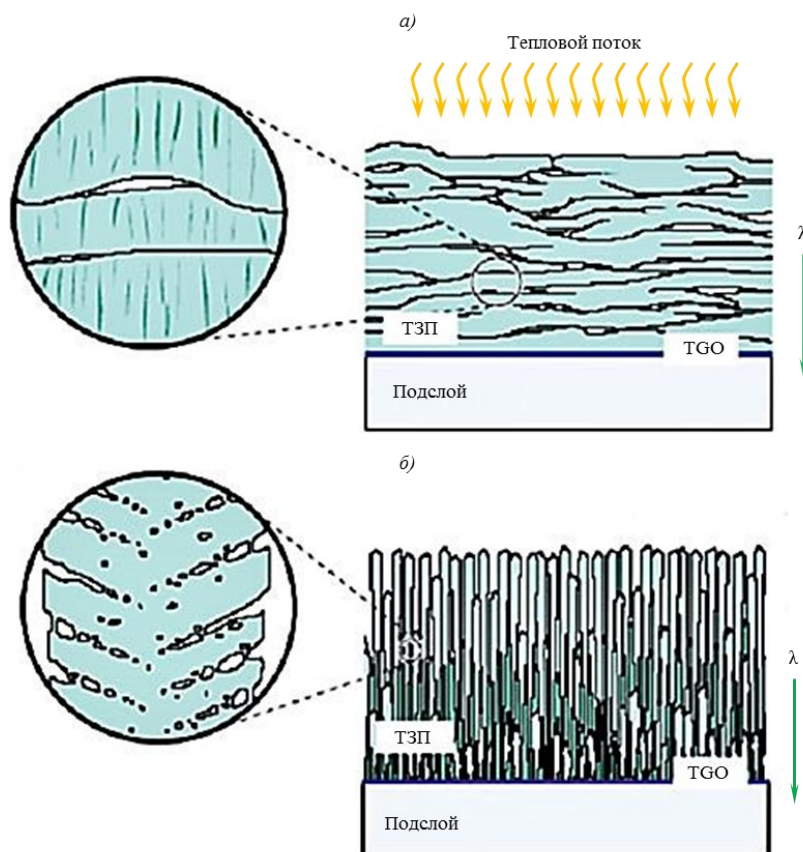


Рис. 1. Схематическое изображение морфологии поры APS-покрытий (а), имеющих низкий коэффициент теплопроводности ( $0,8\text{--}1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) и EB-PVD-покрытий (б) с высоким коэффициентом теплопроводности ( $1,5\text{--}1,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ )

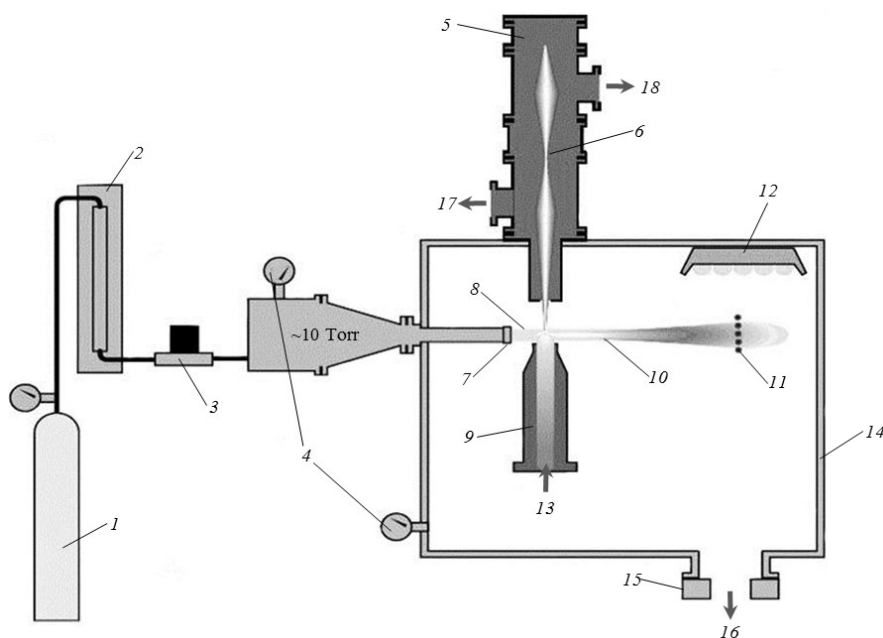


Рис. 2. Схема установки для получения EB-PVD-покрытий: 1 – баллон сжатого гелия; 2 – система очистки; 3 – регулятор расхода газа; 4 – манометры; 5 – электронная пушка; 6 – электронный луч; 7 – сопло; 8 – поток гелия; 9 – тигель; 10 – испаряемый материал; 11 – подложка; 12 – нагреватель; 13 – непрерывная подача материала для испарения; 14 – рабочая камера; 15 – заслонка; 16 – механический насос; 17 – бустерный насос; 18 – диффузионный насос

Рис. 3. Микроструктура зигзагообразного керамического покрытия (YSZ), полученного методом EB-DVD

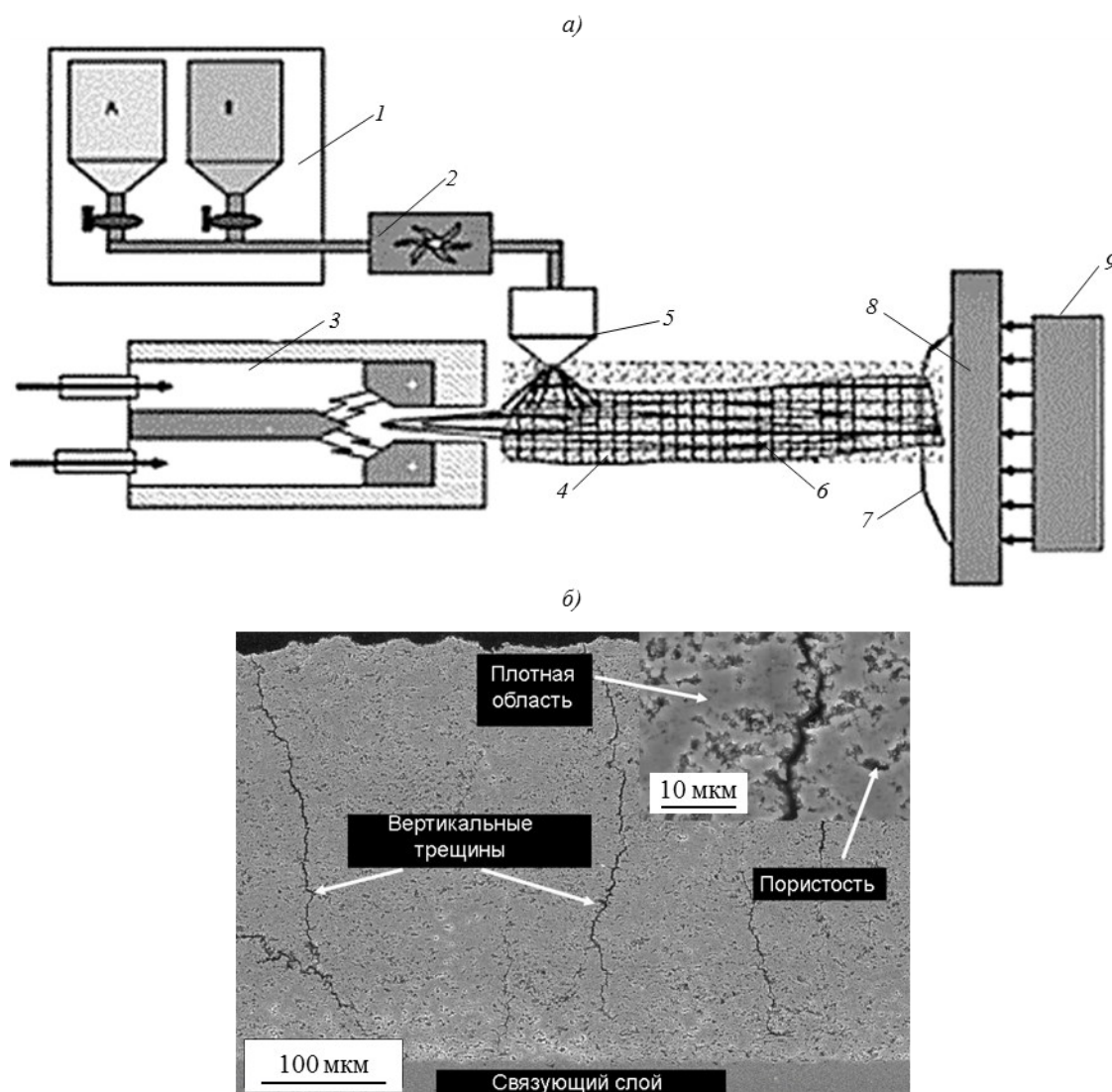
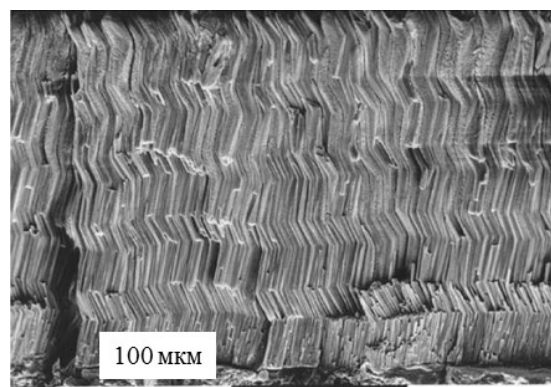


Рис. 4. Получение керамического слоя ТЗП методом SPPS:

*a* – схема установки для плазменного распыления: 1 – резервуары с прекурсором; 2 – насос; 3 – плазменная горелка; 4 – плазма; 5 – распылитель; 6 – распыляемые капли; 7 – покрытие; 8 – подложка; 9 – нагреватель; *б* – микроструктура ( $\times 2000$ ) покрытия, получаемого на данной установке

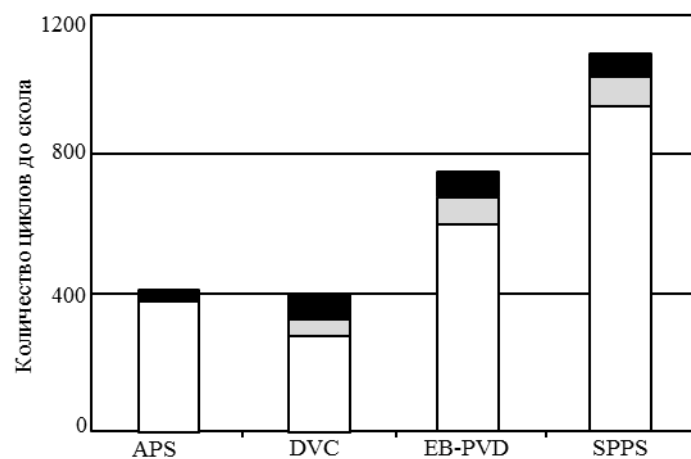


Рис. 5. Термостойкость покрытий, полученных методами APS, BMC, EB-PVD и SPPS, при температуре испытаний до 1121°C в течение 1 ч: □ – минимальные; ■ – средние; ■ – максимальные значения

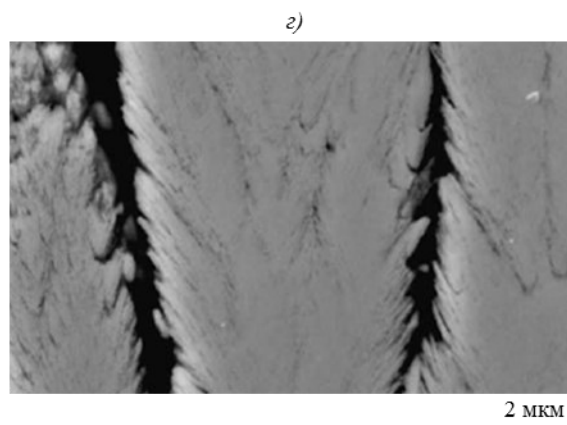
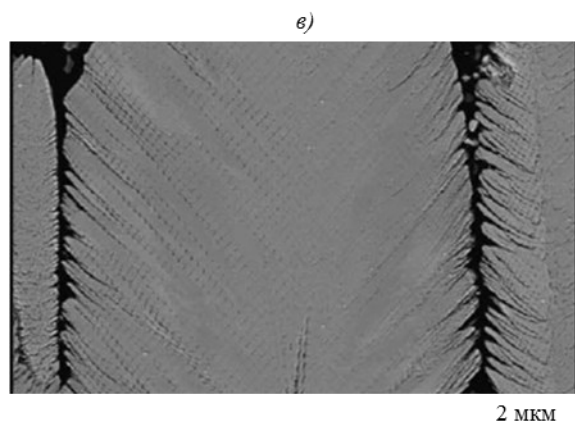
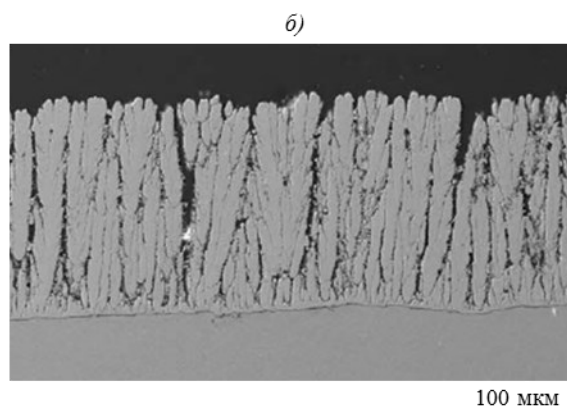
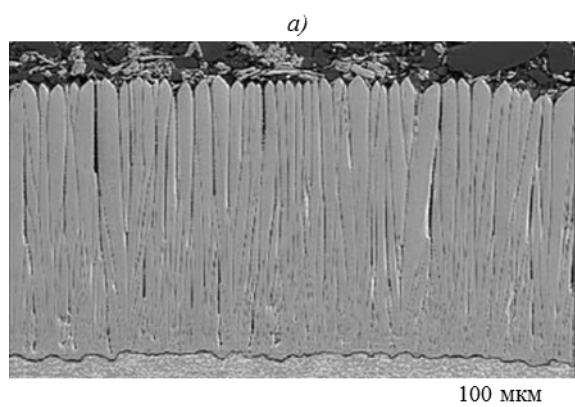


Рис. 6. Микроструктуры ТЗП, нанесенных методами EB-PVD (а, в) и PS-PVD (б, г)

ло создание технологии нанесения покрытий в плазме очень низкого давления (VLPPS) для получения тонких покрытий с большой зоной распыления. При давлении 50–200 Па струя плазмы увеличивается в длину от 100 мм до 1,5 м по сравнению с обычным процессом плазменного напыления, происходящего при давлении 5–20 кПа. При определенных условиях процесса, PS-PVD-методом можно получать структуру ТЗП, очень близкую к структуре EB-PVD-покрытия [19]. Микроструктуры ТЗП, полученные методами EB-PVD и PS-PVD, представлены на рис. 6.

По данным компании Sulzer Metco таким методом можно получать ТЗП с теплопроводностью ~0,8–1 Вт/(м·К) и пористостью ~15%. Однако сопротивление эрозии PS-PVD-покрытий значительно ниже, чем у покрытий, полученных методом EB-PVD, и сопоставимо или даже выше, чем у метода APS.

Для получения ТЗП с керамическим слоем низкой теплопроводности в ВИАМ разработаны уникальная технология и оборудование для магнетронного среднечастотного распыления мишеней на основе сплавов циркония с редкоземельными металлами с последующим плазмохимическим осаждением керамики в среде аргонокислородной плазмы [19]. Процесс магнетронного распыления обеспечивает преимущества по сравнению с элек-

тронно-лучевым методом нанесения ТЗП [21], среди которых можно отметить снижение энергопотребления – до 20 раз и уменьшение массы и габаритных размеров установки – более чем в 5 раз (сравнение с установкой электронно-лучевого напыления фирмы ALD) [22].

### Заключение

Электронно-лучевое нанесение покрытий методом осаждения из паровой фазы (EB-PVD) в настоящее время не может рассматриваться в качестве единственной промышленной технологии получения ТЗП на лопатках авиационных турбин. Из представленных материалов видно, что за последние 5–10 лет достигнуты значительные успехи в разработке новых технологий нанесения керамических слоев ТЗП. Разработан ряд новых промышленных технологий нанесения керамических слоев ТЗП, не уступающих по эксплуатационным свойствам (удельной теплопроводности и термостойкости) EB-PVD-покрытиям, – ТЗП, полученные методами электронно-лучевого направленного осаждения из паровой фазы (EB-DVD) и плазменного физического осаждения из паровой фазы (PS-PVD), а также отечественная технология нанесения керамических слоев ТЗП с использованием магнетронного распыления (разработка ВИАМ).

### 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., Петрушин Н.В., Мубояджян С.А. Структура и фазовый состав монокристаллического сплава ВЖМ-4 с газодиффузионным защитным покрытием //Митом. 2011. №3. С. 28–32.
3. Морозова Г.И., Тимофеева О.Б., Петрушин Н.В. Особенности структуры и фазового состава высокотемпературного никелевого жаропрочного сплава //Митом. 2009. №2. С. 10–16.
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 высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
6. 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.
7. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //Митом. 1995. №2. С. 15–18.
8. 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.
9. 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.
10. Будиновский С.А. Применение аналитической модели определения упругих механических и термических напряжений в многослойной системе в решении задач по созданию жаростойких алюминиевых покрытий //Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. №3. С. 3–11.
11. 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.
12. 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).

- 
13. 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.
  14. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
  15. Чубаров Д.А., Матвеев П.В. Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 43–46.
  16. 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.
  17. Tsipas Sofia. Thermophysical properties of Plasma Sprayed thermal Barrier Coatings. University of Cambridge. 2005. P. 1–25.
  18. Levi C.G. Emerging materials and processes for thermal barrier systems //Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2004. №8. P. 77–91.
  19. Konstantin von Niessen, Malko Gindrat. Plasma Spray-PVD: A New Thermal Spray Process to Deposit Out of the Vapor Phase //Journal of Thermal Spray Technology. 2011. №20 (4). P. 736–743.
  20. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбин высокого давления перспективных ГТД //Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
  21. 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.
  22. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 60–70.
-