

Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-75-88

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ СЛОЕВ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Н.И. Артеменко¹, А.С. Бенклян¹, П.А. Стехов¹, Д.А. Александров¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены основные методы и материалы для нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий. Представлены основные способы изготовления материалов для различных методов нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий (электронно-лучевой, магнетронное распыление и атмосферно-плазменное напыление). Показаны способы увеличения сферичности и прочности частиц порошковых материалов, что повышает стабильность и воспроизводимость процесса плазменного напыления.

Ключевые слова: теплозащитное покрытие, электронно-лучевое нанесение, магнетронное распыление, атмосферно-плазменное напыление

Для цитирования: Артеменко Н.И., Бенклян А.С., Стехов П.А., Александров Д.А. Материалы для нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-75-88.

Scientific article

MATERIALS FOR APPLYING CERAMIC LAYERS OF HEAT-PROTECTIVE COATINGS

N.I. Artemenko¹, A.S. Benklyan¹, P.A. Stekhov¹, D.A. Alexandrov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The main methods and materials for applying ceramic layers of heat-protective coatings are considered. The main methods (electron beam method, magnetron sputtering method and atmospheric plasma spraying method) of manufacturing materials for applying ceramic layers of heat-protective coatings for various applications are considered. There are shown methods to increase sphericity and strength of particles for powder materials, which increase stability and reproducibility of the plasma spraying process.

Keywords: thermal protective coating, electron beam deposition, magnetron sputtering, atmospheric plasma sputtering

For citation: Artemenko N.I., Benklyan A.S., Stekhov P.A., Alexandrov D.A. Materials for applying ceramic layers of heat-protective coatings. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-75-88.

Введение

Одним из наиболее эффективных способов повышения ресурса деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) является применение теплозащитных покрытий на охлаждаемых рабочих и сопловых лопатках турбин [1–4]. Такие покрытия состоят не менее чем из двух слоев (рис. 1):

- жаростойкого металлического слоя, предназначенного для защиты основного материала лопатки от высокотемпературного окисления;
- термобарьерного керамического слоя, который снижает температуру на поверхности жаростойкого металлического слоя за счет градиента температуры при прохождении через него теплового потока от поверхности детали к каналу охлаждения лопатки.



Рис. 1. Конструкция теплозащитного покрытия [5]

Применение теплозащитных покрытий [6–12] в конструкции современных ГТД обусловлено необходимостью повышения их эффективности. Снижение температуры на поверхности жаростойкого металлического слоя обеспечивает повышение его ресурса и, как следствие, межремонтного интервала. Отдельно следует отметить, что применение теплозащитных покрытий для повышения коэффициента полезного действия двигателя за счет повышения температуры газа перед турбиной является ошибочным и опасным подходом, реализуемым конструкторами различных изделий. Керамический слой теплозащитного покрытия имеет ограниченный и слабо контролируемый ресурс, по исчерпанию которого его целостность нарушается. В результате жаростойкий металлический слой подвергается избыточно высокому термическому воздействию, что может привести к его оплавлению и дальнейшему разрушению детали ГТД. Таким образом, повышение комплексной эффективности керамического слоя термозащитного покрытия является важной задачей, решение которой состоит в снижении коэффициента теплопроводности, повышении ресурса и стойкости к скалыванию.

Электронно-лучевое нанесение

Электронно-лучевой метод нанесения покрытий впервые упоминается в работах Б.А. Мовчана и А.В. Демчишина (Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев) в 1963 г., в которых рассмотрена структурно-зонная модель физически осажденных покрытий. За рубежом первые успехи в получении электронно-лучевых покрытий зафиксированы в конце 1960-х гг. в совместных исследованиях компаний Pratt & Whitney (США) и Airco Temescal (США). Выбор электронного луча как источника энергии для испарения обусловлен возможностью управления мощностью электронно-лучевого пучка за счет применения магнитной системы, что, например, в случае использования лазера невозможно. Кроме того, габаритные размеры лазерной установки мощностью несколько десятков киловатт колоссальны и сегодня, не говоря о 1970-х гг. Учтена также более высокая проникающая способность электрона по сравнению с монохромным лазерным излучением.

Суть метода электронно-лучевого нанесения покрытий состоит в бомбардировке электронным пучком поверхности испаряемого материала, который называют штабиком

или слитком. Материал слитка, испаряясь и образуя газовую фазу, осаждается на все поверхности внутри вакуумной камеры установки электронно-лучевого нанесения покрытий, в том числе на поверхности детали. Существует метод направленного электронно-лучевого нанесения покрытий. Он отличается наличием потока инертного газа, направленного в сторону детали и проходящего над испаряемым штабиком. В результате образуется направленный поток испаряемого материала. Такой метод используется для получения специфической структуры керамического слоя. Схема процесса электронно-лучевого нанесения представлена на рис. 2, структуры керамических слоев – на рис. 3.

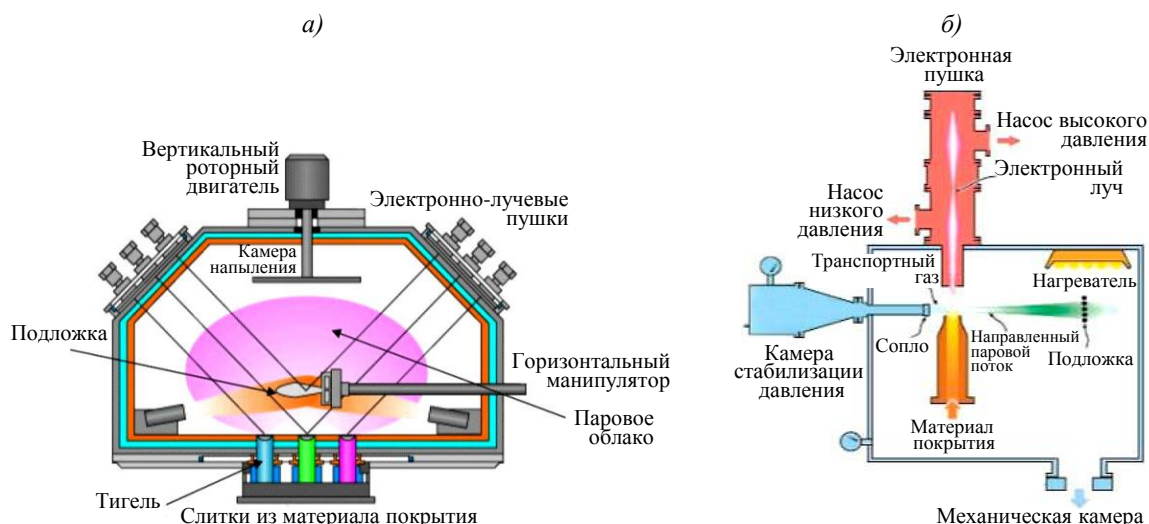


Рис. 2. Схема процесса электронно-лучевого (а) и направленного электронно-лучевого нанесения покрытия (б) [13]. Давление инертного газа в камере стабилизации давления составляет $\sim 1,3$ кПа

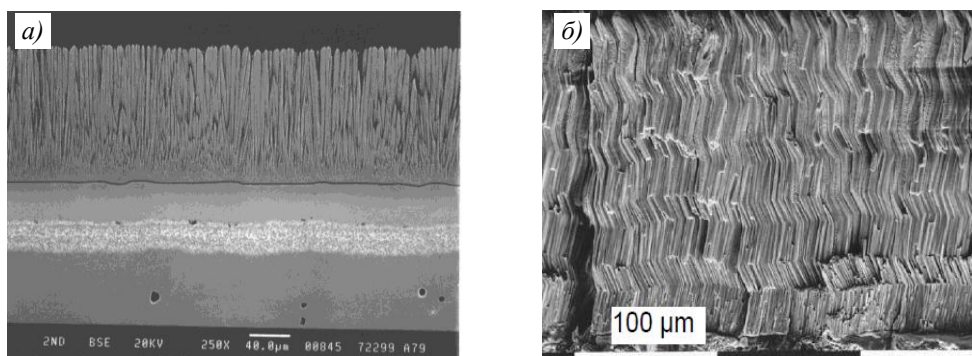


Рис. 3. Структуры керамического слоя теплозащитного покрытия, полученного методом электронно-лучевого (а) и направленного электронно-лучевого нанесения (б) [14]

Структура получаемых керамических слоев столбчатая [8, 9], что положительно сказывается на термоциклической стойкости покрытия на тяжело нагруженных охлаждаемых деталях горячего тракта ротора ГТД, а именно на рабочих лопатках. Отличительной чертой электронно-лучевых керамических слоев также является наследование уровня шероховатости поверхности, подлежащей напылению.

Керамические слитки (штабики) для электронно-лучевого нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий изготавливают методом высокотемпературного спекания предварительно сформированных из порошков моделей. Внешний вид штабиков представлен на рис. 4.

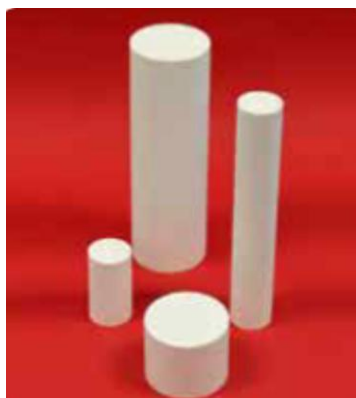


Рис. 4. Керамические слитки производства компании Saint-Gobain Coating Solutions (Канада) [15]

Магнетронное плазмохимическое распыление

В основе метода магнетронного нанесения лежит катодное распыление мишени из осаждаемого материала в особом вакуумном (близком к тлеющему) диодном разряде – магнетронном [16, 17]. В вакуумный объем рабочей камеры установки подается инертный газ (как правило, аргон) до остаточного давления 0,03–0,50 Па. Между катодом-мишенью и анодом, которым может быть как вакуумная камера, так и отдельный изолированный от нее электрод, подается напряжение в диапазоне 300–800 В. У поверхности мишени в скрещенных электрическом и магнитном полях, создаваемых магнетронной распылительной системой, начинается дрейфовое движение электронов, которые при столкновении с нейтральными атомами (молекулами) газа ионизируют их. Ионы газа стремятся на катод (мишень), распыляя его. Электроны дрейфуют в сторону анода, а распыляемые частицы осаждаются на детали, формируя покрытие. Устройство магнетронной распылительной системы показано на рис. 5.

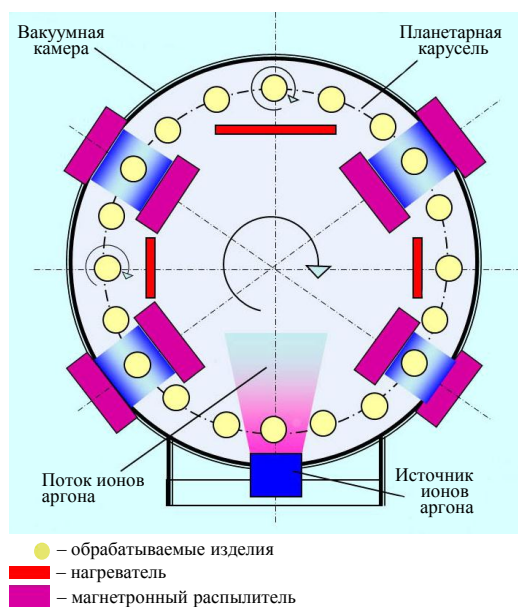


Рис. 5. Устройство магнетронной распылительной системы [17]

За счет достаточно высокой энергии осаждаемых частиц такие покрытия обладают хорошей адгезией к подложке. Метод позволяет осаждать как чистые металлы, так и сплавы. Керамические слои теплозащитных покрытий получают, распыляя

металлическую мишень и подавая в камеру реакционный газ – кислород, который в результате плазмохимического синтеза образует оксидный керамический слой на поверхности детали. Скорость осаждения покрытий зависит от мощности разряда, расстояния от подложки до испарителя и типа магнитной системы. Средняя скорость осаждения магнетронным методом составляет 1–10 мкм/ч. Для магнетронных керамических покрытий характерна ярко выраженная столбчатая структура (рис. 6), что также позволяет применять их на тяжело нагруженных охлаждаемых деталях горячего тракта ротора ГТД.



Рис. 6. Структура теплозащитного покрытия с магнетронным керамическим слоем [18]

Материал для магнетронного метода нанесения керамических слоев теплозащитного покрытия производят в виде металлических мишеней (рис. 7). Обычно мишени изготавливают из сплавов на основе циркония и иттрия – активных металлов, обладающих высоким химическим сродством к кислороду и очень чувствительных к загрязнению. В связи с этим мишени получают методом вакуумно-дугового переплава с последующей механической обработкой.



Рис. 7. Металлическая мишень для магнетронного распыления [17]

Атмосферно-плазменное напыление

Атмосферно-плазменное напыление – разновидность газотермического напыления, при котором жидкая фаза наносимого покрытия формируется в виде малых капель-частиц за счет нагрева плазмообразующей смеси газов (аргон/азот, аргон/водород, аргон/гелий и др.) с помощью энергии дугового разряда. Полученные частицы переносятся на поверхность обрабатываемой детали потоком плазмообразующего газа при атмосферном давлении [19–22]. Эффективность и технологичность метода заключаются в том, что керамический материал подается в зону нагрева в виде порошка, а размеры и форма покрываемых изделий ограничены лишь сложностью привода плазмотрона, который обеспечивает полную обработку поверхности детали. Помимо этого, метод

отличается высокими значениями скорости нанесения покрытия и коэффициента использования материала. Для альтернативных технологий нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий (электронно-лучевой и магнетронной) коэффициент использования материала не превышает 20–30 %, скорость напыления – на порядок меньше. Для двух последних способов следует учитывать необходимость поддержания высокого вакуума, что существенно ограничивает габариты обрабатываемых деталей, определяемые вместимостью вакуумной камеры. Благодаря относительной простоте изготовления и низкой стоимости применение порошкового материала для атмосферного плазменного напыления является преимуществом перед остальными методами.

Принципиальное устройство плазмотрона для плазменного напыления представлено на рис. 8.

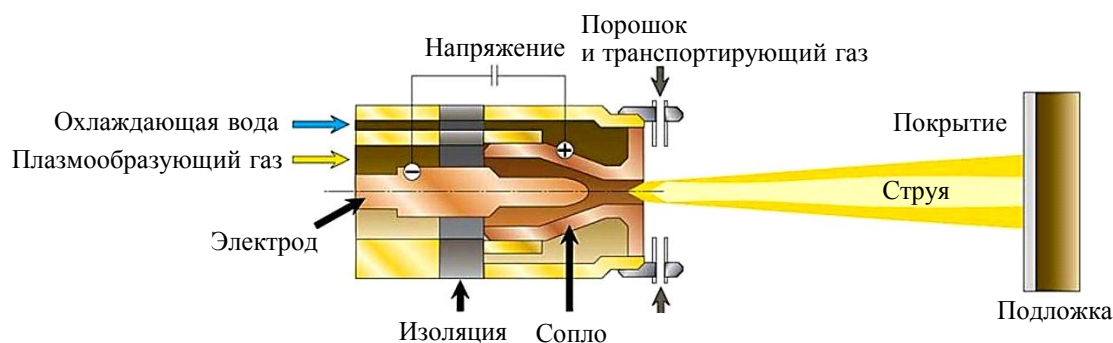


Рис. 8. Принципиальная схема плазмотрона [23]

Проходя через зону дугового разряда между вольфрамовым катодом и вольфрамовой вставкой медного охлаждаемого анода, плазмообразующий газ нагревается, частично ионизируется и истекает из сопла со скоростью до 200–300 м/с. В результате в зоне выходной апертуры сопла-анода формируется плазменный факел, распределение температуры которого приближенно представлено на рис. 9.

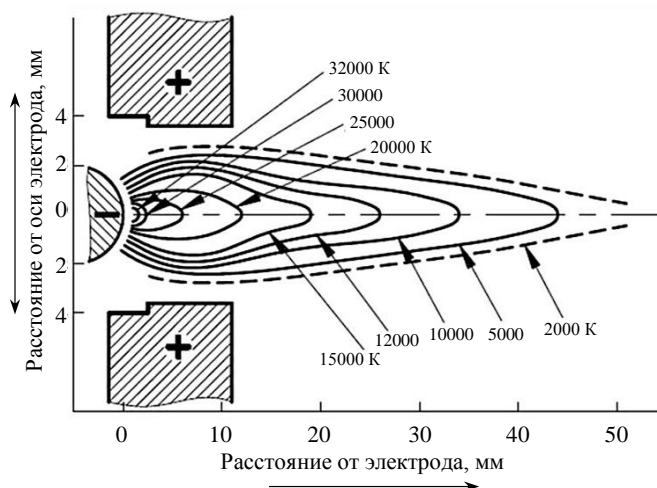


Рис. 9. Распределение температур в плазменной струе в зависимости от расстояния от среза сопла [23]

Порошок наносимого материала поступает в струю на срезе сопла и, расплавляясь, вместе с плазмообразующим газом направляется к подложке. За счет регулирования температуры и скорости плазменной струи достигаются оптимальные режимы

напыления различных материалов в широком диапазоне варьируемых параметров (ток дуги, расход рабочего тела и др.). Для атмосферно-плазменных керамических покрытий характерна ярко выраженная пористость на уровне 10–15 % (рис. 10), что обеспечивает низкие значения коэффициента теплопроводности покрытий и высокий термобарьерный эффект. Однако такие покрытия, в отличие от керамических слоев, полученных электронно-лучевым и магнетронным методами, не обладают стойкостью к совместным термоциклическим и механическим нагрузкам. Атмосферно-плазменные покрытия применяют на деталях статора горячего тракта ГТД, например на сопловых лопатках, деталях и сборочных единицах камер сгорания.



Рис. 10. Микроструктура теплозащитного покрытия с керамическим слоем, полученным методом атмосферно-плазменного напыления [24]

Коэффициент использования материала при плазменном напылении также зависит от угла разлета частиц в плазменной струе – чем меньше угол разлета, тем большее количество частиц достигнет поверхности обрабатываемой детали. Авторами данной статьи установлена эмпирическая зависимость угла разлета от степени сферичности частиц порошка, которая определяется отношением минимального и максимального поперечного размера частицы (рис. 11). Уменьшение угла разлета возможно за счет повышения сферичности частиц порошка. Для идеально сферической частицы эта величина составляет единицу.

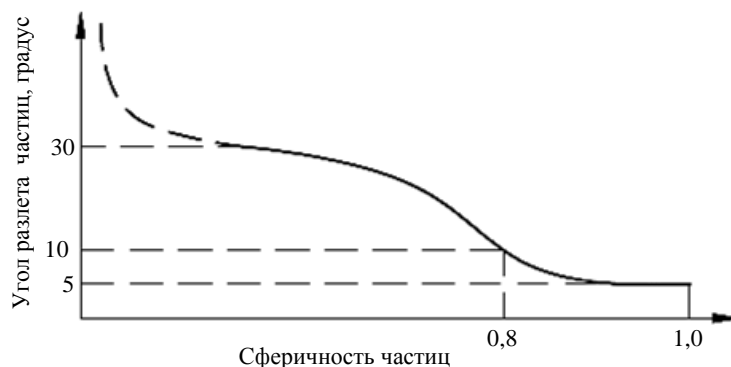


Рис. 11. Зависимость угла разлета частиц от сферичности порошка

В зависимости от способа производства керамических порошков для плазменного напыления получают частицы с различными размерами, формой и распределением по фракциям. От этих свойств зависит процесс плавления порошкового материала в плазменной струе. Для повышения эффективности процесса напыления важным также является распределение химического состава внутри одной частицы.

Способы изготовления керамических порошков могут быть одно- или многостадийными, однако всегда включают одну и ту же конечную стадию – рассев на необходимые фракции. Наиболее простым методом является спекание порошковой смеси в атмосферной печи при температурах $>1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ с дальнейшим размолом. При таком способе получаемые частицы порошка приобретают осколочную форму и имеют незначительную пористость. Сферичность частиц составляет 0,7–0,8 (рис. 12).

Более сложным методом производства керамических порошков для плазменного напыления является сплавление с последующим размолом. Для этого смеси керамических материалов нагревают в высокотемпературных открытых печах до температур $>2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а затем проводят кристаллизацию расплава керамики. При таком способе получаемые частицы порошка также приобретают осколочную форму, однако имеют существенно более низкую пористость, практически равную нулю. Сферичность частиц также составляет 0,7–0,8 (рис. 13).

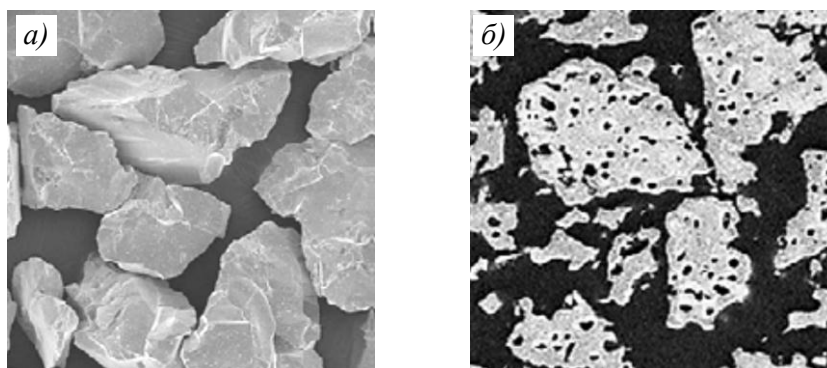


Рис. 12. Внешний вид (а) и поперечное сечение (б) спеченного и размолотого порошка [25]

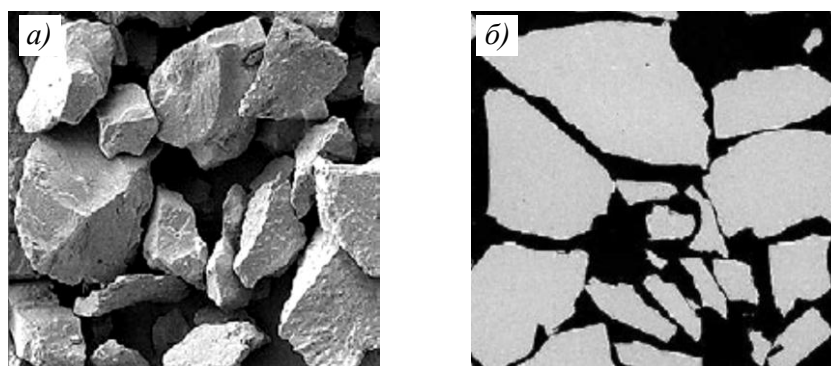


Рис. 13. Внешний вид (а) и поперечное сечение (б) сплавленного и размолотого порошка [25]

С использованием представленных методов производят порошковые материалы с частицами осколочной формы, что снижает коэффициент использования материала при напылении. Существует группа методов, обеспечивающая возможность получения частиц со сферической морфологией.

Агломерирование – процесс объединения мелких частиц в одну крупную. Наиболее распространенным методом агломерирования является распылительная сушка, которая проводится в распылительных сушилках (рис. 14).

Порошки исходных компонентов оксидных керамик смешиваются в определенной пропорции и подвергаются предварительному размолу в защитной среде, чаще всего в спиртах. После размолы размер частиц суспензии не превышает 2 мкм. Для достижения необходимого уровня вязкости в суспензию добавляют водные растворы

твердых спиртов, например поливинилового. После суспензия распыляется в камере сушки, в которой поддерживается температура $>(100-150) \text{ }^\circ\text{C}$. Частицы приобретают сферическую форму за счет силы поверхностного натяжения. Жидкая фаза испаряется, остается сферическая частица, состоящая из более мелких частиц (рис. 15).

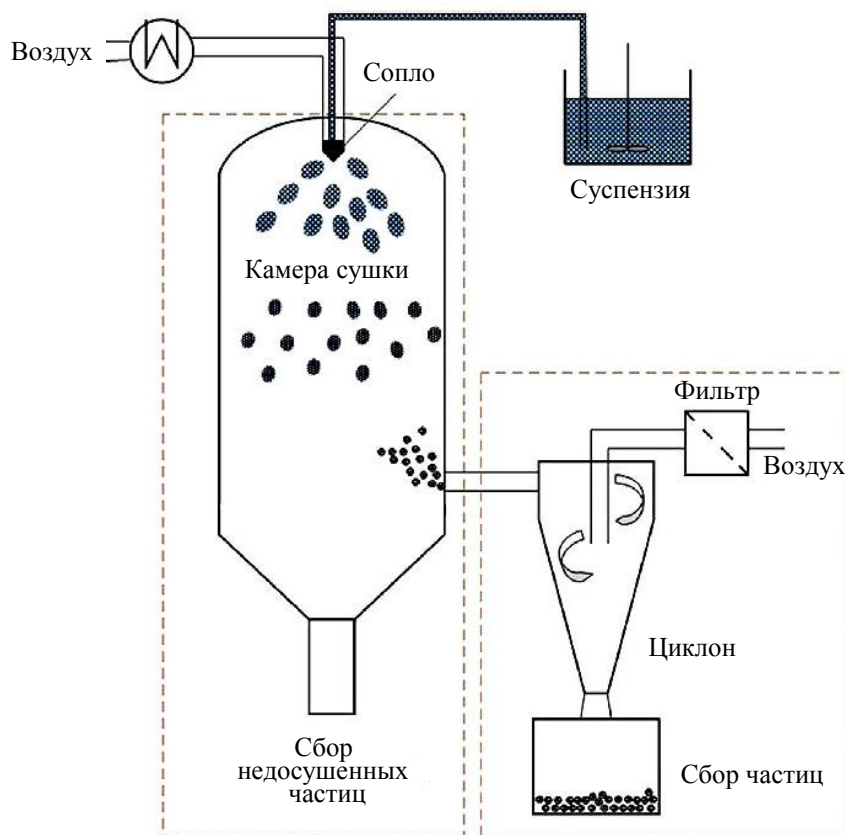


Рис. 14. Схема распылительной сушилки [26]

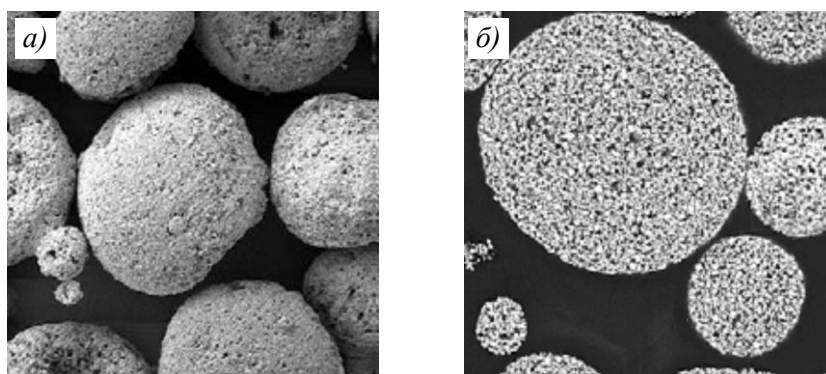


Рис. 15. Внешний вид (а) и поперечное сечение (б) агломерированного порошка [25]

Сферичность получаемых частиц составляет $\sim(0,95-1,0)$. Они обладают равномерно распределенной пористостью, но достаточно низкой прочностью. Для повышения прочности частиц проводят дополнительную обработку. Одним из вариантов такой обработки является спекание – нагрев частиц, полученных методом агломерирования, в атмосферных печах до температур $\sim 1100 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате частица приобретает высокую прочность, поры становятся крупнее, сферичность не изменяется (рис. 16). Такой комплексный метод изготовления называется агломерированием и спеканием.

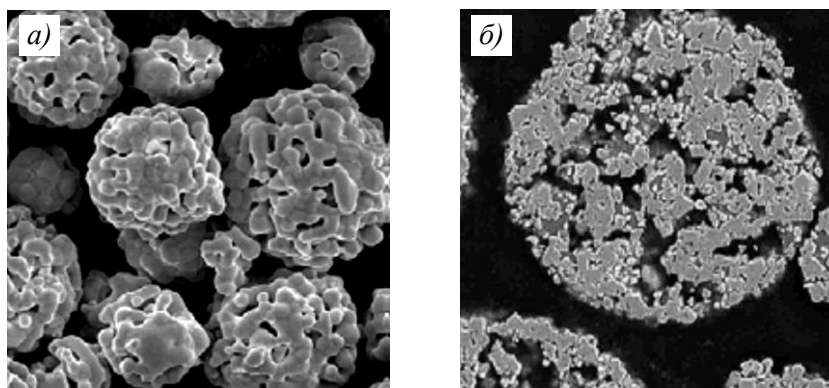


Рис. 16. Внешний вид (а) и поперечное сечение (б) агломерированного и спеченного порошка [25]

Еще одним способом повышения прочности частицы является плазменная сфероидизация. Частицы порошка, полученного методом агломерирования, пропускают через поток индуктивно связанной плазмы, в результате чего происходит их полное или неполное плавление (в зависимости от режима) и дальнейшая кристаллизация в виде сферической частицы. При полном плавлении внутри частицы образуется сферическая полость за счет конгломерации мелких пор на стадии нахождения частицы в жидкой фазе. Сферичность полученных частиц составляет 0,95–1,0 (рис. 17). Такой комплексный метод изготовления называется агломерированием и плазменной сфероидизацией.

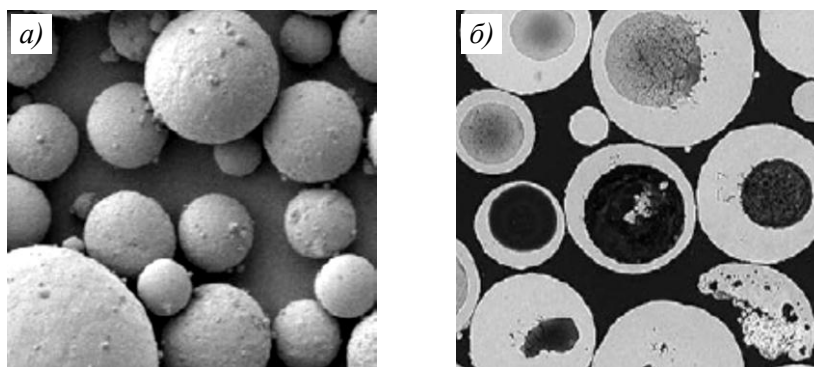


Рис. 17. Внешний вид (а) и поперечное сечение (б) агломерированного и сфероидизированного плазмой порошка [25]

Плазменную сфероидизацию также можно использовать для придания сферичности частицам осколочной формы. Однако для такого процесса необходима большая мощность потока индуктивно связанной плазмы.

Заключения

Рассмотрены основные методы и материалы для нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий. Показано, что теплозащитные покрытия с керамическим слоем, полученным электронно-лучевым и магнетронным методами, имеют столбчатую структуру, что положительно сказывается на стойкости к совместным термоциклическим и механическим нагрузкам. Такие покрытия применяются на тяжело нагруженных деталях ротора горячего тракта ГТД – рабочих лопатках. Теплозащитные покрытия с керамическим слоем, полученным методом атмосферно-плазменного напыления, имеют пористую структуру, что обеспечивает низкий коэффициент теплопроводности. Атмосферно-плазменные покрытия применяются на деталях статора горячего тракта ГТД – сопловых лопатках, деталях и сборочных единицах камеры сгорания.

Представлены основные способы изготовления материалов, применяемых для нанесения керамических слоев теплозащитных покрытий различными методами. Для порошковых материалов показаны способы увеличения сферичности и прочности частиц, что повышает стабильность и воспроизводимость процесса плазменного напыления.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Денисова В.С., Малинина Г.А., Власова О.В., Виноградова А.Ю. Влияние добавок тетраборида кремния на свойства жаростойких покрытий для защиты жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.
4. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 06. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
5. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Металлы. 2012. № 1. С. 5–13.
6. Лощинин Ю.В., Будиновский С.А., Размахов М.Г. Теплопроводность теплозащитных легированных оксидами РЗМ покрытий $ZrO_2-Y_2O_3$, полученных магнетронным нанесением // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
7. Доронин О.Н., Артеменко Н.И., Стехов П.А., Воронов В.А. Нанесение керамических слоев теплозащитных покрытий на основе систем $Gd_2O_3-ZrO_2-HfO_2$ и $Sm_2O_3-Y_2O_3-HfO_2$ // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 3 (68). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
8. Liu Q., Huang S., He A. Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines // Journal of materials science & technology. 2019. Vol. 35. No. 12. P. 2814–2823. DOI: 10.1016/j.jmst.2019.08.003.
9. Zhang B., Chen K., Baddour N., Patnaik P. Failure and life evaluation of EB-PVD thermal barrier coatings using temperature-process-dependent model parameters // Corrosion Science. 2019. Vol. 156. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.04.020.
10. Ma X., Rivellini K., Ruggiero P., Wildridge G. Toward durable thermal barrier coating with composite phases and low thermal conductivity // Journal of Thermal Spray Technology. 2020. Vol. 29. P. 423–432. DOI: 10.1007/s11666-020-00979-x.
11. Shi L., Sun Z., Lu Y. The combined influences of film cooling and thermal barrier coatings on the cooling performances of a film and internal cooled vane // Coatings. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 861. DOI: 10.3390/coatings10090861.
12. Herman H. Powders for thermal spray technology // KONA Powder and Particle Journal. 1991. Vol. 9. P. 187–199. DOI: 10.14356/kona.1991024.
13. Конденсация испаряемого материала в вакууме (дуговой, магнетронный, электронно-лучевой методы). URL: <http://www.helpiks.org> (дата обращения: 23.09.2024).
14. Amaya C., Prias-Baragan J.J., Aperador W. Thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia thin films with a zigzag microstructure // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121. P. 245110.

15. Saint-gobain coating solutions. URL: <http://www.coatingsolutions.saint-gobain.com> (дата обращения: 23.09.2024).
16. Chevallier J., Chalk C. Modelling evaporation in electron-beam physical vapour deposition of thermal barrier coatings // *Emergent Materials*. 2021. Vol. 4. No. 6. P. 1499–1513. DOI: 10.1007/s42247-021-00284-5.
17. Будиновский С.А., Доронин О.Н., Косьмин А.А., Бенклян А.С. Влияние состояния мишени системы Zr–Y–PЗМ на скорость ее распыления при нанесении керамического слоя ТЗП с помощью установки УОКС-3 // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.08.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.
18. Mehta A., Vasudev H., Singh S. et al. Processing and advancements in the development of thermal barrier coatings: a review // *Coatings*. 2022. Vol. 12. No. 9. P. 1318. DOI: 10.3390/coatings12091318.
19. Gaedike B., Guth S., Kern F. et al. Deposition of 3YSZ-TiC PVD coatings with high-power impulse magnetron sputtering (HiPIMS) // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. No. 6. P. 2753. DOI: 10.3390/app11062753.
20. Kaziev A., Kolodko V., Lisenkov V., Tumarkin A. Cu Metallization of Al₂O₃ Ceramic by Coating Deposition from Cooled-and Hot-Target Magnetrons // *Coatings*. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 238. DOI: 10.3390/coatings13020238.
21. Heydari P. A review on functionally graded-thermal barrier coatings (FG-TBC) fabrication methods in gas turbines // *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2022. Vol. 6. No. 2. P. 18–26. DOI: 10.11648/j.ajmme.20220602.12.
22. Li R. High-Temperature oxidation resistance and molten salt corrosion study of YSZ, CeYSZ, and YSZ/CeYSZ thermal barrier coatings by atmospheric plasma spraying // *Coatings*. 2024. Vol. 14. No. 1. P. 102. DOI: 10.3390/coatings14010102.
23. Артеменко Н.И. Исследование режимов работы серийного плазмотрона Metco F4 с использованием плазмообразующих газов аргона и азота // *Труды ВИАМ*. 2018. № 5 (65). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-76-89.
24. Артеменко Н.И., Татарников С.В., Доронин О.Н. Исследование влияния параметров нанесения керамического слоя теплозащитного покрытия ZrO₂–7%Y₂O₃ методом плазменного напыления на производительность технологического процесса // *Труды ВИАМ*. 2023. № 4 (122). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.08.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.
25. Дружнова Я.С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 10 (116). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.09.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.
26. Stunda-Zujeva A., Irbe Z., Berzina-Cimdina L. Controlling the morphology of ceramic and composite powders obtained via spray drying – A review // *Ceramics International*. 2017. Vol. 43. P. 11543–11551.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Denisova V.S., Malinina G.A., Vlasova O.V., Vinogradova A.Yu. The influence of silicon tetraboride additives on properties of heat-resistant coatings for nickel alloys protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.

4. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 06. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
5. Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A. Heat-resistant and heat-protective coatings for high-pressure turbine blades of advanced gas turbine engines. *Metally*, 2012, no. 1, pp. 5–13.
6. Loshchinin Yu.V., Budinovskiy S.A., Razmakhov M.G. Heat conductivity of heat-protective coatings ZrO_2 – Y_2O_3 alloyed by REM oxides obtained by magnetron application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
7. Doronin O.N., Artemenko N.I., Stekhov P.A., Voronov V.A. Deposition of ceramic layers of heat protection coatings based on the system Gd_2O_3 – ZrO_2 – HfO_2 and Sm_2O_3 – Y_2O_3 – HfO_2 . *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-108-119.
8. Liu Q., Huang S., He A. Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines. *Journal of materials science & technology*, 2019, vol. 35, no. 12, pp. 2814–2823. DOI: 10.1016/j.jmst.2019.08.003.
9. Zhang B., Chen K., Baddour N., Patnaik P. Failure and life evaluation of EB-PVD thermal barrier coatings using temperature-process-dependent model parameters. *Corrosion Science*, 2019, vol. 156, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.corsci.2019.04.020.
10. Ma X., Rivellini K., Ruggiero P., Wildridge G. Toward durable thermal barrier coating with composite phases and low thermal conductivity. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29, pp. 423–432. DOI: 10.1007/s11666-020-00979-x.
11. Shi L., Sun Z., Lu Y. The combined influences of film cooling and thermal barrier coatings on the cooling performances of a film and internal cooled vane. *Coatings*, 2020, vol. 10, no. 9, p. 861. DOI: 10.3390/coatings10090861.
12. Herman H. Powders for thermal spray technology. *KONA Powder and Particle Journal*, 1991, vol. 9, pp. 187–199. DOI: 10.14356/kona.1991024.
13. *Evaporated material condensation in vacuum (arc, magnetron, electron beam methods)*. Available at: <http://www.helpiks.org> (accessed: September 23, 2024).
14. Amaya C., Prias-Baragan J.J., Aperador W. Thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia thin films with a zigzag microstructure. *Journal of Applied Physics*, 2017, vol. 121, p. 245110.
15. *Saint-gobain coating solutions*. Available at: <http://www.coatingsolutions.saint-gobain.com> (accessed: September 23, 2024).
16. Chevallier J., Chalk C. Modelling evaporation in electron-beam physical vapour deposition of thermal barrier coatings. *Emergent Materials*, 2021, vol. 4, no. 6, pp. 1499–1513. DOI: 10.1007/s42247-021-00284-5.
17. Budinovskiy S.A., Doronin O.N., Kosmin A.A., Benklyan A.S. Influence of the state of the YSZ target on its sputtering rate during deposition of a TBC ceramic layer by the UOKS-3 unit. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 30, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-85-92.
18. Mehta A., Vasudev H., Singh S. et al. Processing and advancements in the development of thermal barrier coatings: a review. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 9, p. 1318. DOI: 10.3390/coatings12091318.
19. Gaedike B., Guth S., Kern F. et al. Deposition of 3YSZ-TiC PVD coatings with high-power impulse magnetron sputtering (HiPIMS). *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 6, p. 2753. DOI: 10.3390/app11062753.
20. Kaziev A., Kolodko V., Lisenkov V., Tumarkin A. Cu Metallization of Al_2O_3 Ceramic by Coating Deposition from Cooled-and Hot-Target Magnetrons. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 2, p. 238. DOI: 10.3390/coatings13020238.
21. Heydari P. A review on functionally graded-thermal barrier coatings (FG-TBC) fabrication methods in gas turbines. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 18–26. DOI: 10.11648/j.ajmme.20220602.12.

22. Li R. High-Temperature oxidation resistance and molten salt corrosion study of YSZ, CeYSZ, and YSZ/CeYSZ thermal barrier coatings by atmospheric plasma spraying. *Coatings*, 2024, vol. 14, no. 1, p. 102. DOI: 10.3390/coatings14010102.
23. Artemenko N.I. Research of the operation modes of the Metco F4 serial plasma-gun using plasma-forming gases argon and nitrogen. *Trudy VIAM*, 2018, no. 5 (65), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 25, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-76-89.
24. Artemenko N.I., Tatarnikov S.V., Doronin O.N. Investigation of the influence of the parameters of applying the ceramic layer of the $ZrO_2-7\% Y_2O_3$ heat-shielding coating by plasma spraying on the productivity of the technological process. *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-69-80.
25. Druzhnova Ya.S. Development of methods for thermal spraying of hardening tires based on tungsten and chromium carbides (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 30, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115.
26. Stunda-Zujeva A., Irbe Z., Berzina-Cimdina L. Controlling the morphology of ceramic and composite powders obtained via spray drying – A review. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, pp. 11543–11551.

Информация об авторах

Артеменко Никита Игоревич, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Бенклян Артем Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Стехов Павел Александрович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Александров Денис Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikita I. Artemenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem S. Benklyan, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Pavel A. Stekhov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis A. Alexandrov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.10.2024.
The article was submitted 07.10.2024; approved and accepted for publication after reviewing 08.10.2024.