

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ
ENGINEERING TECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 621.793.7:621.762

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-47-56

**СОЗДАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ОКСИДНОЙ
КЕРАМИКИ**

Пантелеенко Федор Иванович¹, Оковитый Вячеслав Александрович¹,
Девоино Олег Георгиевич¹, Оковитый Василий Вячеславович¹,
Асташинский Валентин Миронович²,
Останин Олег Александрович³

¹ Белорусский национальный технический университет² Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси³ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* для корреспонденции: panteleyenkofi@tut.by

**Информация о статье**

Поступила:

30 декабря 2024 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

11 июня 2025 г.

Ключевые слова:

многослойные плазменные
покрытия, керамический слой,
жаропрочный металлический
подслой, промежуточные
металлокерамические слои,
тетрагональная фаза,
моноклинная фаза,
термоциклирование.

Аннотация.

В данной статье проведен анализ используемых материалов, способов получения и свойств многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур, и выбраны основные направления по исследованию процессов их формирования. Современные плазменные покрытия для высокотемпературного применения в большинстве вариантов – это многослойная система, состоящая из внешнего керамического слоя и жаростойкого металлического подслоя с рядом промежуточных металлокерамических слоев. Подслой необходим для понижения величин термических напряжений в созданном защитном покрытии, индуцированных различными коэффициентами термического расширения у металлических и керамических материалов. Промежуточные металлокерамические слои служат для монотонного выравнивания физико-механических свойств между основными слоями. Слой керамики создает необходимую термостойкость у покрытия. Однако при достаточно широком изучении плазменных защитных покрытий на базе диоксида циркония до сих пор полностью не решены вопросы по увеличению термостойкости керамических слоев и снижения их газопроницаемости. Для решения этой проблемы необходимо установить режимы нанесения слоев, обеспечивающие требуемые характеристики защитных покрытий, найти действенные способы управления уровнем остаточных напряжений и содержанием пор в покрытиях, разработать технологии получения многослойных защитных покрытий с плавным переходом технологических свойств по сечению покрытия от металлической подложки к слою керамики. Наиболее применяемыми способами формирования керамического слоя многослойных покрытий, работающих в условиях высоких температур, являются процессы плазменного напыления и электронно-лучевого испарения. В последнее время плазменный метод становится более предпочтительным, поскольку значительно снижает стоимость покрытий, позволяет более жестко управлять составом покрытия, характеризуется более высокой производительностью, обеспечивает гибкое регулирование процесса напыления. Качественные многослойные плазменные покрытия, работающие в условиях высоких температур, должны создаваться из

материалов, обладающих равномерностью химического и фазового состава по всему сечению порошка, со строго оптимальными размерами и необходимой морфологией, для создания в сформированном покрытии максимального присутствия тетрагональной фазы с минимизацией размера зерен у фазовых включений.

Для цитирования: Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Останин О. А. Создание многослойных плазменных покрытий из оксидной керамики// Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 47-56. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-47-56, EDN: XGRQZZ

Введение

Защитные плазменные покрытия для работы при повышенных температурах представляют из себя систему слоев (Рис. 1), включающую металлический подслоу из сплавов на основе никеля или кобальта, наружный слой, как правило, из термостойкой керамики и спектр переходных металлокерамических слоев с различным процентным содержанием керамики и металла [1-12]. Основопологающим фактором разрушения плазменных защитных покрытий, эксплуатируемых в условиях повышенных температур, является целый спектр термомеханических напряжений, приобретенных в результате частых теплосмен в агрегатах, благодаря рассогласованию показателей термического расширения у металлической подложки и рабочего керамического слоя и из-за гетерогенности распределения спектра температурных полей в уже сформированном покрытии. Термомеханические напряжения растут и под влиянием возникающих в процессе напыления остаточных напряжений. Для их компенсации благодаря эффектам пластичности и ползучести используется металлический подслоу.

Регресс во время эксплуатации покрытий осуществляется в результате совместного

воздействия целого спектра полей остаточных напряжений:

1) возникающих в процессе формирования покрытия;

2) вызванных высокими скоростями нагрева и охлаждения (термошоком);

3) обусловленных наличием градиента температур по поперечному сечению керамического слоя и неравномерным нагревом отдельных участков.

Действия указанных полей напряжений усугубляются неравномерностью в их распределении из-за дефектов в полученном покрытии – трещин, дефектов межчастичных контактов, пор и т. д. Основная причина при разрушении покрытий – совместное действие остаточных напряжений и нагрузок при термоциклах. Оно вызвано рассогласованностью значений термического расширения керамики и металлической основы [4]. Возможность управления уровнем остаточных напряжений в значительной мере является основной задачей технологии создания покрытия. Напряжения в значительной степени снижаются при правильном выборе материалов. Попытки рассчитать напряжение в плазменных покрытиях, работающих в условиях высоких температур, без учета их релаксации приводят к

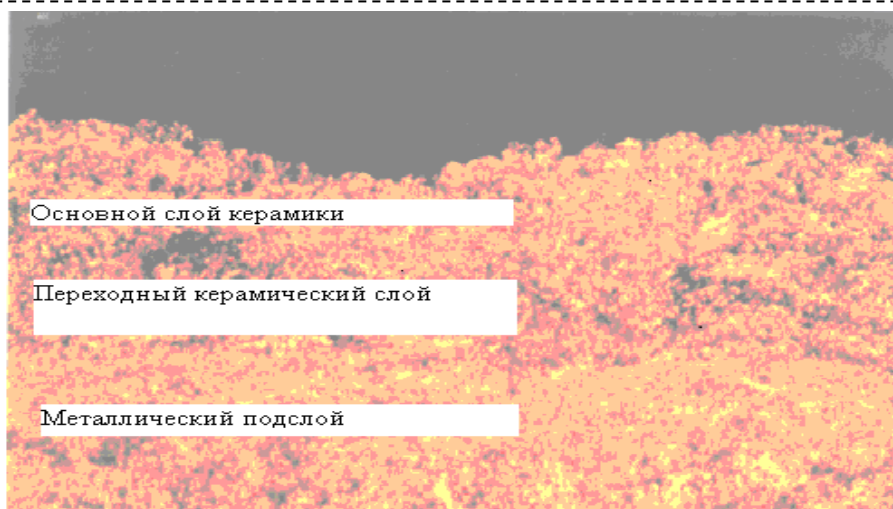


Рис. 1. Состав покрытия на основе порошка диоксида циркония
Fig. 1. Coating composition based on zirconium dioxide powder

неправдоподобно высоким величинам, превышающим прочность покрытий. Важным моментом для проектирования покрытий является также тот факт, что образование больших параллельных трещин в покрытии происходит во время его охлаждения. Для системы $ZrO_2-Y_2O_3$ этот процесс идет наиболее интенсивно при охлаждении ниже 820 К. Макроразрушение покрытия может наблюдаться при нагреве только после того, как произошло расслоение во время предыдущего охлаждения. Причиной такого разрушения может быть более интенсивный нагрев участка покрытия над трещиной. Чувствительность керамического слоя многослойных плазменных покрытий к скорости охлаждения должна быть обязательно учтена при оптимизации формы изделия со сформированным покрытием.

Формирование многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур. Из применяемых материалов для нанесения керамических слоев в многослойных плазменных покрытиях, работающих в условиях

высоких температур – статорных лопатках, охлаждаемых лопатках первой ступени ГТД, камерах сгорания и др. (Рис. 2) – наиболее часто используются композиции на основе частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦД) из-за высоких эксплуатационных свойств. Данный материал характеризуется невысоким значением у коэффициента теплопроводности ($\lambda-0,6-1,3 \text{ Втм}^{-1}\text{К}^{-1}$) при достаточно хорошем для оксидной керамики значении коэффициента линейного термического расширения ($\alpha-6-13 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$) и прекрасными механическими свойствами. Из целого ряда стабилизирующих добавок наиболее долговечен Y_2O_3 – ЧСЦД при термоциклировании в условиях нагрева выше 1240 К. Максимальное значение параметра сопротивления термоусталости наблюдается при содержании оксида иттрия в узком интервале порядка 6...8% (Рис. 3) [5]. При этом, тем не менее, в покрытии обязательно присутствуют моноклинная и кубическая фазы. Ухудшение долговечности плазменного покрытия при повышенном содержании стабилизатора в

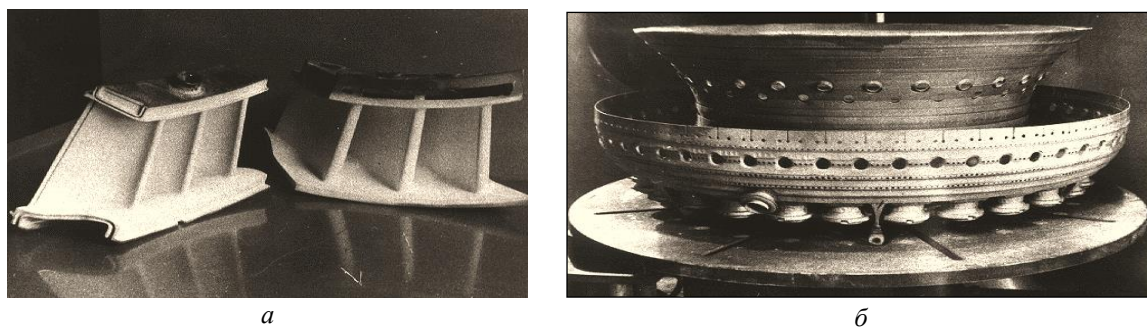


Рис. 2. Авиационные детали с плазменными покрытиями, для защиты от высоких температур: а – блоки сопловых лопаток; б – камера сгорания

Fig. 2. Aviation parts with plasma coatings for protection against high temperatures: a – blocks of nozzle blades; b – combustion chamber

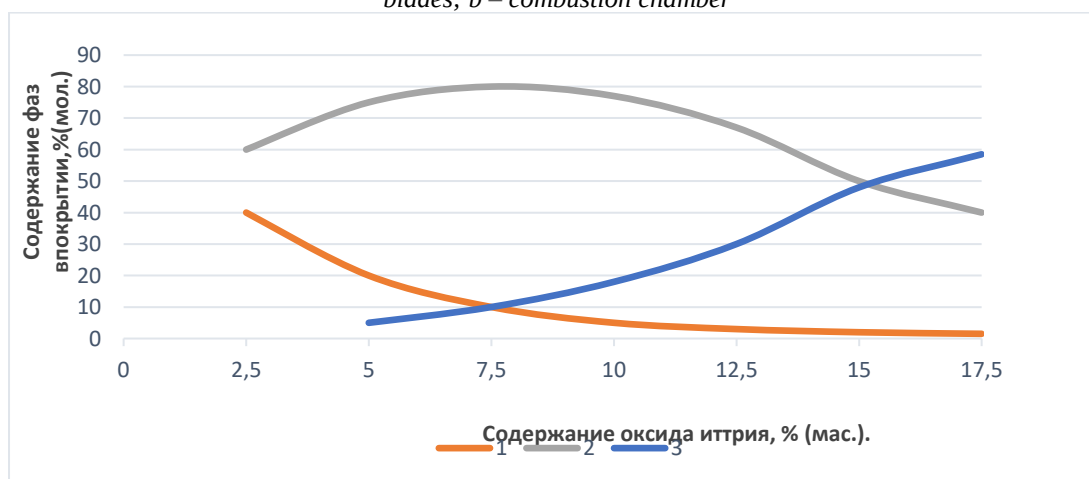


Рис. 3. Влияние процентного содержания иттрия на фазовый состав у сформированных плазменных покрытий $ZrO_2-Y_2O_3$, фазы диоксида циркония: 1 – моноклинная, 2 – тетрагональная, 3 – кубическая

Fig. 3. The influence of the percentage of yttrium on the phase composition of the formed plasma coatings $ZrO_2-Y_2O_3$, zirconium dioxide phases: 1 – monoclinic, 2 – tetragonal, 3 – cubic

исходном порошковом материале можно объяснить несколькими причинами. Во-первых, у исходных порошковых материалов по сечению неравномерное распределение у стабилизатора, что наследует и структура покрытия (Рис. 4). В сформированном покрытии совместно с богатыми стабилизатором фазами ($Zr_3Y_4O_{12}$) находится тетрагональная фаза (ZrO_2 -8,3% Y_2O_3) и моноклинная фаза (ZrO_2 -1,6% Y_2O_3) [7]. Сегрегационное распределение стабилизатора в созданном покрытии значительно растет при осуществлении термоциклирования при стабилизации диоксида циркония, ухудшая степень неоднородности фаз покрытия. Из-за этого необходима равномерность как химического, так и фазового состава в сечении первоначальных материалов и созданного покрытия. Это одна из основных задач технологии плазменного формирования многослойных покрытий. Во-вторых, в

результате быстрого охлаждения частиц при плазменном напылении формируется неравновесная фаза тетрагонального $ZrO_2 \rightarrow t'$ («непревращаемая»), пересыщенная стабилизатором по отношению к равновесной t -фазе ZrO_2 , которая играет важнейшую роль при формировании многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях повышенных температур. Ее стабильность связана с размерами фазовых включений, увеличиваясь при размерах зерна менее чем на 1-1,5 мкм [8]. Поэтому получение оптимального размера у фазовых включений является основной задачей при формировании многослойных плазменных покрытий. Наиболее применяемыми способами формирования керамического слоя многослойных покрытий, работающих в условиях высоких температур, являются процессы плазменного напыления и электронно-лучевого испарения. Каждому из них присущи

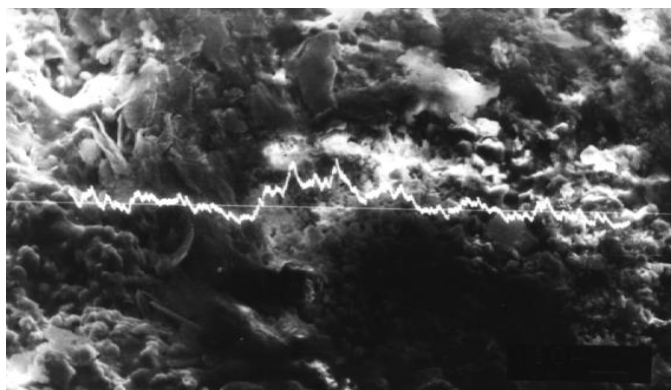
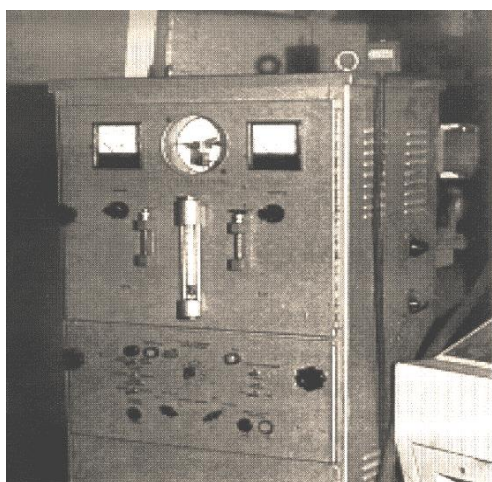
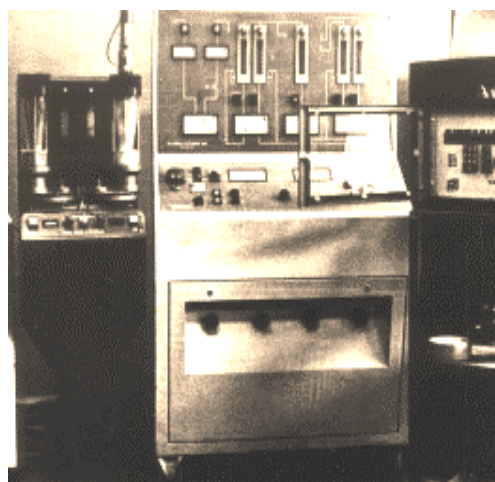


Рис. 4. Распределение элемента иттрия по поверхности многослойного плазменного покрытия, работающего в условиях высоких температур (порошок ЦИ-7)

Fig. 4. Distribution of the yttrium element over the surface of a multilayer plasma coating operating at high temperatures (CI-7 powder)



а



б

Рис. 5. Установки для плазменного воздушного напыления: а – установка УПУ-3Д; б – установки «Plasma-Technik AG»

Fig. 5. Installations for plasma air spraying: а – UPU-3D installation; б – installations “Plasma-Technik AG”

определенные преимущества и недостатки. Важнейшим преимуществом метода электронно-лучевого испарения является возможность получения керамического слоя столбчатой структуры. Такая структура в плоскости покрытия характеризуется близким к нулю модулем упругости, что делает возможным деформирование покрытия без разрушения керамического слоя. Однако качество таких покрытий может снижаться при попадании в трещины конденсированного топлива либо абразива. Возникающие при охлаждении напряжения сжатия в плоскости керамического покрытия и растяжения в металлическом подслое и подложке могут не только привести к разрушению покрытия, но и к распространению усталостной трещины в подложку, что снижает характеристики термической усталости всего изделия.

В последнее время плазменный метод становится более предпочтительным, поскольку значительно снижает стоимость покрытий, позволяет более жестко управлять составом покрытия, характеризуется более высокой производительностью, обеспечивает гибкое регулирование процесса напыления (Рис. 5). При формировании покрытий, сформированных из диоксида циркония, необходимо создать определенную пористость и реализовать фрагментацию и микрорастрескивание. Это необходимо для повышения уровня допустимых значений деформаций у керамики. Фрагментацию и микрорастрескивание формируют в направлениях, перпендикулярных к подложке, для препятствия макроскопическому растрескиванию созданного покрытия по схеме торможения или отклонения созданными порами зоны распространения образующейся трещины. Пористые материалы по сравнению с компактными всегда имеют более низкие значения модуля упругости. Значения высокой пористости у керамического слоя в многослойном плазменном покрытии формируются при варьировании режимов напыления (разные расходы плазмообразующих газов, увеличение или уменьшение дистанций напыления, снижение подводимых мощностей, увеличение фракций у порошковых частиц). Сформированная структура многослойного защитного покрытия характеризуется формой, видом и размером у созданных пор [9]. Присутствие после напыления в покрытии небольших угловатых и острых пор создает новые концентраторы напряжений, вызывая ухудшение параметров вязкости разрушения. Нахождение в покрытии крупных, равномерно распределенных и округлых пор притупляет и тормозит трещины. Однако из-за падения уровня прочностных характеристик у пористых многослойных защитных покрытий существуют

строгие оптимальные значения общей пористости, позволяющие достигать максимальной долговечности у защитного покрытия. В условиях возрастания давлений рабочих газов ГТД, а также агрессивного воздействия газовых сред и эрозии твердыми частицами стойкость высокопористых покрытий резко снижается. Для достижения необходимой стойкости таких покрытий требуется максимальная плотность материала в направлении от внешней поверхности покрытия к подложке [10]. Процесс фрагментации у сформированного многослойного плазменного покрытия осуществляется при напылении и эксплуатации благодаря изменениям в микрообъемах полученного покрытия из-за фазовых превращений в ЧСДЦ. Уровень напряжений растяжения в плоскости сформированного покрытия во время нагрева выше, чем в перпендикулярном направлении. Это вызвано большим значением термических расширений металла в сравнении с керамикой. При взаимодействии полей напряжений, вызванных процессами фазовых превращений и термоциклической нагрузкой, происходит преимущественное микрорастрескивание покрытия в перпендикулярном к подложке направлении. Для получения такого вида фрагментирования покрытия используют определенную термообработку – термошок или перегрев покрытия при напылении, например, применение небольшой дистанции напыления. Это приводит к довольно произвольной ориентации полученных микротрещин и сложности при контроле остаточных напряжений в сформированном покрытии. У многослойных плазменных покрытий на эксплуатационные показатели влияют как технологические параметры порошковых материалов, так и процесс напыления. Для формирования качественных покрытий из ЧСДЦ необходимо применение химически чистых порошковых материалов, вызывающих дестабилизацию высокотемпературной фазы у диоксида циркония, например таких, как оксид кремния. Из-за сегрегации легкоплавкого элемента оксида кремния по границам зерен и на поверхности у порошковых частиц диоксида циркония его наличие в исходном порошке нежелательно. Наличие межкристаллитной влаги в порошковом материале понижает термическую стабильность у тетрагональной фазы диоксида циркония ZrO_2 . Определяющим параметром процесса формирования покрытий является и форма порошковых частиц [11].

Использование исходных сферических частиц в покрытии создает максимальное количество скругленных пор, способствует равномерному и качественному нагреву частиц, что особенно важно при невысокой теплопроводности

керамических материалов. При применении материалов с развитой поверхностью на них хорошо абсорбируется влага и это негативно сказывается на качественных характеристиках покрытий. Технологические параметры процесса формирования плазменного покрытия из диоксида циркония создают его пористость, фазовый состав, вид и уровень остаточных напряжений. На характеристики долговечности сформированного многослойного покрытия значительное влияние оказывает размер частиц. При увеличении средних размеров фракционных составов порошковых частиц виден рост общей пористости, способствующий росту сопротивления термоудару. Присутствие крупных пор замедляет и тормозит перемещение у образующихся трещин. Но фракции крупных размеров плохо плавляются при нахождении в потоке плазменной струи, создают целый ряд неравномерностей фазового состава покрытия, при этом значительно ухудшают показатели когезионной прочности. Технологические факторы у процесса распыления делятся на ряд групп в соответствии со степенью проплавления вводимых в струю частиц порошкового материала, с приобретенными скоростями, интенсивностью в процессе охлаждения напыляемой основы и непосредственно покрытия. Температурный режим поверхности значительно формирует процентное соотношение у созданных в нанесенном защитном покрытии спектре фаз – моноклинной, тетрагональной или кубической. Определены характеристики тока у плазменной горелки, при соблюдении или превышении которых происходит скачкообразный рост эксплуатационной долговечности защитных покрытий из ЧСДЦ из-за качественного проплавления находящихся в струе частиц материала. Плохо проплавленные частицы характеризуются повышенным содержанием моноклинной фазы [12]. Применение специальных насадок для увеличения мощности, повышения температуры и скорости у частиц применяемого порошка вызывает рост характеристик показателей плотности, а также прочности у созданных покрытий. Применяемые методы охлаждения защитных покрытий, подложки, их интенсивность оказывают непосредственное влияние на параметры долговечности, а также на форму, вид и размер фазовых включений, на их прочностные характеристики, формируют уровень и вид спектра остаточных напряжений. Снижение долговечности покрытий при увеличении температуры подложки обусловлено более высоким КТР металла, при последующем охлаждении в плоскости покрытия приводящим к появлению напряжений сжатия, которые вызывают напряжения растяжения в поперечном

направлении. Такое напряженное состояние способствует отслаиванию покрытия при испытаниях. Однако значительное снижение температуры в контакте напыляемых частиц и подложки приводит к снижению их прочности, что также отрицательно сказывается на долговечности. При напылении низкая теплопроводность ZrO_2 приводит к образованию в формирующемся слое градиента температур. Для уменьшения возникающих напряжений в покрытии необходимо дополнительное охлаждение области вокруг пятна напыления. Охлаждение покрытия в большей степени улучшает свойства покрытия, чем охлаждение подложки. На основании перечисленных требований к охлаждению формирующегося слоя ЧСДЦ при напылении осуществление оптимизации режимов плазменного напыления, стабилизированного ZrO_2 , по коэффициенту использования материала не совсем корректно, т. к. данная характеристика непрерывно растет с увеличением температуры подложки.

Однако при достаточно широком изучении покрытий на основе ZrO_2 до сих пор остаются нерешенными вопросы увеличения термостойкости керамического слоя и снижения газопроницаемости. Для решения этой проблемы необходимо создать комплексную модель процесса плазменного напыления покрытий, позволяющую установить режимы нанесения слоев, обеспечивающие требуемые характеристики, а также способы управления содержанием пор и уровнем остаточных напряжений в покрытиях, разработать технологию формирования многослойных покрытий, позволяющую создать покрытие с плавным переходом технологических свойств от металлической подложки к наружному керамическому слою.

Выводы

Качественные многослойные плазменные покрытия, работающие в условиях высоких температур, должны создаваться из материалов, обладающих равномерностью химического и фазового состава по всему сечению порошка, со строго оптимальными размерами и необходимой морфологией, для создания в сформированном покрытии максимального присутствия тетрагональной фазы с минимизацией размера зерен у фазовых включений. Наряду с фазами, богатыми стабилизатором $Zr_3Y_4O_{12}$, в сформированном покрытии присутствует тетрагональная фаза состава ZrO_2 -8,3% Y_2O_3 и моноклинная фаза состава ZrO_2 -1,6% Y_2O_3 . Сегрегационное распределение стабилизатора в созданном покрытии значительно растет при осуществлении термоциклирования при стабилизации диоксида циркония, ухудшая степень неоднородности фаз покрытия. Из-за этого необходима равномерность как

химического, так и фазового состава в сечении первоначальных материалов и созданного покрытия. Это одна из основных задач технологии плазменного напыления многослойных покрытий. В результате быстрого охлаждения частиц при плазменном напылении формируется неравновесная фаза тетрагонального $ZrO_2 \rightarrow t'$ («непревращаемая»), пересыщенная стабилизатором по отношению к равновесной t -фазе ZrO_2 , которая играет важнейшую роль при формировании многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях повышенных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оковитый В. А., Пантелеенко А. Ф. Оптимизация процесса напыления износостойких покрытий на основе многофункциональной оксидной керамики // «Обработка металлов». 2015. № 2(67). С. 46–54.
2. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Талако Т. Л., Пантелеенко А. Ф. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики // «Обработка металлов». 2015. № 2(67). С. 39–45.
3. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А. Формирование многофункциональных плазменных покрытий на основе керамических материалов. Минск : БНТУ, 2019. 231 с.
4. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Оковитый В. В. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой // Наука и техника. 2018. Вып. 3. С. 183–189.
5. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. В. Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики, модифицированной высокоэнергетическими воздействиями // Наука и техника. 2018. Вып. 5. С. 377–389.
6. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Девойно О. Г., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храмов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Соболевский С. Б. Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных покрытий на элементах экранной защиты для международного научно-технического журнала // Наука и техника. 2016. Вып. 5. С. 357–364.
7. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Пантелеенко Е. Ф. Исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий диоксид циркония – нихром // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Том 4. № 3. С. 100–105.
8. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храмов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Соболевский С. Б. Многослойные композиционные плазменные оксидные покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония // Наука и техника. 2017. Вып. 5. С. 422–431.
9. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храмов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Соболевский С. Б. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой NiCr и твердый ZrO_2) // Наука и техника. 2018. Вып. 1. С. 21–28.
10. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Соболевский С. Б., Оковитый В. В. // Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием // Наука и техника. 2020. Вып. 6. С. 615–620.
11. Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Оковитый В. А., Сидоров В. А., Рафаил К. Разработка композиционного материала на основе керамики с применением добавок соединений тугоплавких металлов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2020. № 4(140). С. 18–24.
12. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методами плазменного напыления на воздухе // Наука и техника. 2021. Вып. 5. С. 369–374.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Пантелеенко Федор Иванович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), чл.-кор. НАН Б, доктор техн. наук, профессор, e-mail: panteleyenkovfi@tut.by

Оковитый Вячеслав Александрович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), кандидат техн. наук, e-mail: niil_svaraka@bntu.by

Девойно Олег Георгиевич, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), заведующий заведующий ОНИЛ ПилТ, доктор техн. наук, проф., e-mail: plazteh@bntu.by

Оковитый Василий Вячеславович, Инженер, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

Асташинский Валентин Миронович, Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси (220072, Минск, п. Бровки, 15, Беларусь), чл.-кор. НАН Б, доктор физ.-мат. наук, профессор, e-mail: ast@hmti.ac.by

Останин Олег Александрович, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), e-mail: ooa.tma@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Пантелеенко Ф. И. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; концептуализация исследования; выводы.

Оковитый В. А. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; выводы.

Девойно О. Г. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; сбор и анализ данных; выводы.

Оковитый В. В. – обзор соответствующей литературы; написание текста, сбор и анализ данных.

Асташинский В. М. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования.

Останин О. А. – обзор соответствующей литературы; сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

CREATION OF MULTILAYER PLASMA COATINGS FROM OXIDE CERAMICS

Fyodor I. Panteleenko ¹, Vjacheslav A. Okovity ¹,
Oleg G. Devoino ¹, Vasily V. Okovity ¹,
Valentin M. Astashinsky ²,
Oleg A. Ostanin ³

¹ Belarusian National Technical University,

² Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus

³ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: panteleyenkovfi@tut.by



Article info

Received:

30 December 2024

Accepted for publication:

22 April 2025

Accepted:

30 April 2025

Published:

11 June 2025

Keywords: multilayer plasma coatings, ceramic layer, heat-

Abstract.

This article analyzes the materials used, methods of obtaining and properties of multilayer plasma coatings operating at high temperatures and selects the main directions for studying the processes of their formation. Modern plasma coatings for high-temperature applications in most cases are a multilayer system that includes an outer ceramic layer and a heat-resistant metal sublayer, with intermediate ceramic-metal layers. The sublayer is needed to reduce the level of thermal stresses in the formed coating, which arise due to different thermal expansion coefficients for metal and ceramic materials. Intermediate ceramic-metal layers serve for monotonous alignment of physical and mechanical properties between the main layers. The ceramic layer creates the necessary heat resistance for the coating. However, with a fairly extensive study of plasma coatings based on zirconium dioxide, the issues of increasing the thermal stability of ceramic layers and reducing their gas permeability have not yet been completely resolved. To solve this problem, it is necessary to establish the regimes for applying layers that provide the required characteristics of protective coatings, to find effective ways to control the level of residual stresses and the content of pores in

resistant metal sublayer, intermediate ceramic-metal layers, tetragonal phase, monoclinic phase, thermal cycling.

coatings, to develop technologies for obtaining multilayer protective coatings with a smooth transition of technological properties across the coating cross section from the metal base to the outer ceramic layer. The most commonly used methods for forming a ceramic layer of multilayer coatings operating at high temperatures are the processes of plasma spraying and electron beam evaporation. Recently, the plasma method has become more preferable because it significantly reduces the cost of coatings; allows for more rigid control of the coating composition, is characterized by higher productivity, and provides flexible control of the spraying process. High-quality multilayer plasma coatings operating at high temperatures must be created from materials that have a uniform chemical and phase composition over the entire cross-section of the powder, with strictly optimal dimensions and the necessary morphology, to create the maximum presence of the tetragonal phase in the formed coating while minimizing the grain size of the phase phases. inclusions.

For citation: Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Ostanin O.A. Creation of multilayer plasma coatings from oxide ceramics. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 2(168):47-56. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-47-56, EDN: XGRQZZ

REFERENCES

1. Okovity V.A., Panteleenko A.F. Optimization of the spraying process of wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics. *Processing of metals*. 2015; 2(67):46–54. (in Russ.)
2. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Talako T.L., Panteleenko A.F. Technology for obtaining a composite material based on multifunctional oxide ceramics. *Metalworking*. 2015; 2(67):39–45. (in Russ.)
3. Panteleenko F.I., Okovity V.A. Formation of multifunctional plasma coatings based on ceramic materials. BNTU-Minsk. 2019. 231 p. (in Russ.)
4. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Astashinsky V.M., Okovity V.V. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a non-equilibrium structure. *Science and Technology*. 2018; 3:183–189. (in Russ.)
5. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Uglov V.V.// Formation and study of plasma powder coatings from oxide ceramics modified by high-energy effects *Science and Technology*. 2018; 5:377–389. (in Russ.)
6. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Devoino O.G., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Khramtsov P.P., Chernik M.Yu., Uglov V.V., Sobolevsky S.B. Formation and study of multilayer composite oxide plasma coatings on elements of screen anti-meteor protection for an international scientific and technical journal. *Science and technology*. 2016; 5:357–364. (in Russ.)
7. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Panteleenko E.F. Investigation of plasma two-layer composite coatings zirconium dioxide – nichrome. *Actual problems in mechanical engineering*. 2017; 4(3):100–105. (in Russ.)
8. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Khramtsov P.P., Chernik M.Yu., Uglov V.V., S.B. Sobolevskiy S.B. Multilayer composite oxide plasma coatings on screen protection elements based on zirconium dioxide. *Science and technology*. 2017; 5:422–431. (in Russ.)
9. Okovity V.A. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous NiCr metal layer and solid ZrO₂) / Okovity V.A., “Science and technology”, BNTU - Minsk. - 2018. Issue. 1.- S. 21-28. (in Russ.)
10. Okovity, V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Khramtsov P.P., Chernik M.Yu., Uglov V.V., S.B. Sobolevsky S.B. Formation of plasma powder coatings from cermets with subsequent high-energy modification. *Science and technology*. 2020; 6:615–620. (in Russ.)
11. Panteleenko F.I., Astashinsky V.M., Okovity V.A. Sidorov V.A., Rafail K. Development of a composite material based on ceramics with the use of additives of compounds of refractory metals. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020; 4(140):18–24. (in Russ.)
12. Okovity V.A. Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M. Optimization of the process of applying coatings from metal-ceramic powders by plasma spraying in air. *Science and technology*. 2021; 5:369–371. (in Russ.)

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Fyodor I. Panteleenko, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), member-cor. NAS of Belarus, Dr. S. in Engineering, prof., e-mail: panteleyenkovfi@tut.by

Vjacheslav A. Okovity, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), C. Sc. in Engineering, e-mail: niil_svarka@bntu.by

Oleg G. Devoino, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), Head of ONIL PiLT, Doctor of Technical Sciences, Prof., (+375 17 331-30-58 e-mail: plazteh@bntu.by)

Vasily V. Okovity, Senior engineer, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus)

Valentin M. Astashinsky, Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus (220072, Minsk, Brovka, 15), member-cor. NAS of Belarus, Dr. Sc. in Physics and Mathematics, e-mail: ast@hmti.ac.by

Oleg A. Ostanin, Senior lecturer of the Department of Mechanical Engineering Technology, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennyaya st., Kemerovo, 650000, Russia), e-mail: ooa.tma@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Fyodor I. Panteleenko – setting a research problem; scientific management; conceptualization of the study; conclusions.

Vjacheslav A. Okovity – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; writing text, collecting and analyzing data; conclusions.

Oleg G. Devoino – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study; data collection and analysis; conclusions.

Vasily V. Okovity – review of relevant literature; writing text, collecting and analyzing data.

Valentin M. Astashinsky – setting a research problem; scientific management; review of relevant literature; conceptualization of the study.

Oleg A. Ostanin – review of relevant literature; data collection and analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

