

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-5-17

УДК 621.793.71

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

OVERVIEW OF MODERN CERAMIC COATING APPLICATIONS

Пантелеенко Федор Иванович¹,

чл.-корр. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф., e-mail: panteleyenkofi@tut.by

Fedor I. Panteleenko,

corresp. member NAS of Belarus, Dr. Sc. in Engineering, Professor.

Оковитый Вячеслав Александрович¹,

канд. техн. наук, e-mail: niil_svarka@bntu.by

Vyacheslav A. Okovity, C. Sc. in Engineering

Сидоров Виктор Александрович¹,

кандидат техн. наук, e-mail: va_sidorov@tut.by

Viktor A. Sidorov¹, Candidate of Technical Sciences

Оковитый Василий Вячеславович¹

Инженер

Okovity Vasily V., engineer

Асташинский Валентин Миронович²,

чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф., e-mail: ast@hmti.ac.by

Astashinsky Valentin M.,

corresp. member NAS of Belarus, Dr. Sc. in Engineering, Professor.

¹Белорусский национальный технический университет, 220013, Минск, пр. Независимости, 65, Беларусь

¹Belarusian National Technical University, 220013, Minsk, 65, Nezavisimosti Avenue

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Минск, П. Бровки, 15, Беларусь

²Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus, 220072, Minsk, P. Brovki 15

Аннотация:

В статье проведен анализ современного применения и особенностей металлокерамических плазменных покрытий. Можно констатировать, что данные композиции (оксид-металлическая составляющая) используются в качестве диэлектрических, теплозащитных и износостойких покрытий. В рамках данной работы особое внимание уделено вопросам влияния формируемой структуры на физико-механические и эксплуатационные свойства сплавов $MCrAlYTa$, армированных тугоплавкими оксидами (например, $Al_2O_3-Al_2O_3-TiO_2$) и керамике $Al_2O_3-TiO_2$ с добавлением твердых металлов. Чистые $MCrAlYTa$ не подходят для трибологических применений, потому что их низкая твердость может привести к очень сильному износу в условиях скользящего контакта, особенно на этапах приработки при низких температурах. Поэтому изготовление композитных покрытий на основе сплавов $MCrAlYTa$, армированных тугоплавкими оксидами, представляется необходимым решением для того, чтобы связать стойкость металла к окислению с твердостью и химической стабильностью керамической фазы. Покрытия, получаемые из диоксида титана-оксида алюминия, обладают невысокой износостойкостью и твердостью в условиях трения при высоких температурах, невысокой гетерогенностью покрытий, связанной с неоптимальным соотношением мягкой и твердой составляющих в покрытии. Создание композиционного керамического материала на основе оксидной керамики с добавлением молибдена, обладающего хорошими технологическими характеристиками,

устойчивого к поддержанию химического состава в процессе газотермического напыления и способного формировать плазменные покрытия с высокой износостойкостью, определенной степенью гетерогенности (получение оптимальных соотношений мягкой и твердой составляющих в покрытии) позволит получить покрытия с низким коэффициентом трения, с высокой твердостью, износостойкостью, обрабатываемостью.

Ключевые слова: металллокерамические плазменные покрытия, диэлектрические, теплозащитные и износостойкие покрытия, формируемые структуры, физико-механические и эксплуатационные свойства, М-кроли, диоксид титана-оксид алюминия.

Информация о статье: поступило в редакцию 06.03.2021

Abstract:

The article analyzes the current application and features of metal-ceramic plasma coatings. It can be stated that these compositions (oxide-metal component) are used as dielectric, heat-shielding and wear-resistant coatings. In this work, special attention is paid to the influence of the formed structure on the physico-mechanical and operational properties of MCrAlYTa alloys reinforced with refractory oxides (for example, Al₂O₃-TiO₂) and ceramics Al₂O₃-TiO₂ with the addition of hard metals. Pure MCrAlYTa are not suitable for tribological applications because their low hardness can lead to very high wear under sliding contact conditions, especially during the running-in phases at low temperatures. Therefore, the fabrication of composite coatings based on MCrAlYTa alloys reinforced with refractory oxides seems to be a necessary solution in order to relate the resistance of the metal to oxidation with the hardness and chemical stability of the ceramic phase. The coatings obtained from titanium dioxide-alumina have low wear resistance and hardness under friction conditions at high temperatures, low heterogeneity of coatings associated with the non-optimal ratio of soft and hard components in the coating. Creation of a composite ceramic material based on oxide ceramics with the addition of molybdenum, which has good technological characteristics, is resistant to maintaining the chemical composition during thermal spraying and is capable of forming plasma coatings with high wear resistance, a certain degree of heterogeneity (obtaining optimal ratios of soft and hard components in the coating), will allow us to obtain coatings with a low coefficient of friction, high hardness, wear resistance, and machinability.

Keywords: metal-ceramic plasma coatings, dielectric, heat-shielding and wear-resistant coatings, formed structures, physical and mechanical and operational properties, M-rabbits, titanium dioxide-aluminum oxide.

Article info: received March 06, 2021

Введение. Из обзора литературы [1-15] известно, что самыми перспективными для получения износостойких плазменных покрытий, повышающих долговечность и надежность механизмов и машин являются те материалы, которые могут выдерживать максимальные нагрузки без пластической деформации в парах трения в большом интервале эксплуатационных температур и обладают наивысшей стойкостью при абразивном износе, способностью работать в агрессивных средах и в вакууме. Наиболее перспективными для работы в таких условиях являются композиции, которые состоят из металллокерамической матрицы и равномерно распределенной в ней оксидной составляющей. Работоспособность таких композиций обеспечивается высокими прочностными свойствами металллокерамической матрицы. Постоянное воспроизведение данного слоя при работе в условиях трения, равномерно распределенной по всему объему материала, создает нужный эффект самосмазываемости. Все

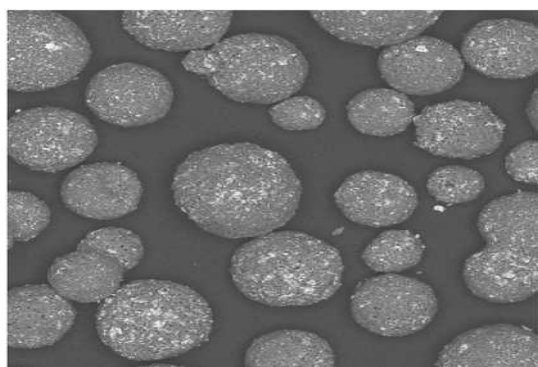


Рис. 1. СЭМ высушенного распылением порошка NiCrAlY-Al₂O₃

Fig. 1. SEM of spray-dried NiCrAlY-Al₂O₃ powder

вышеперечисленные особенности позволяют предполагать, что плазменные износостойкие порошковые покрытия, как защитные, так и антифрикционные, найдут широкое применение в технике [6-12]. Атмосферное плазменное напыление (APS) – это действующий, коммерчески доступный метод, который использовался многими исследователями для создания экономически выгодных покрытий. Использование высоких температур и плотности энергии позволяет наносить покрытия из тугоплавких материалов, таких как Al₂O₃, ZrO₂ и др., которые трудно расплавить с помощью традиционных процессов термического

Таблица 1. Параметры плазменного напыления
 Table 1. Parameters of plasma sputtering

Режимы напыления	Значения параметров
Ток, А	240
Напряжение дуги, В	35
Расход плазмообразующего газа (Ar-N ₂), slpm	20
Расход транспортирующего газа (N ₂), slpm	3
Дистанция напыления, мм	100
Расход порошка, г /мин	2,7

напыления [7]. По сравнению с керамическим плазменным покрытием керметные, состоящие из керамических частиц, связанных с металлическими частицами, проявляют превосходную стойкость к тепловому удару в высокотемпературной атмосфере. Кроме того, они обладают совместными преимуществами керамики и металла, такими как твердость и ударная вязкость. Кроме того, эффективность покрытий может быть существенно повышена путем дальнейшего модифицирования их структуры при последующей высокоэнергетической обработке [8]. Высокоэнергетические источники подводимой энергии обладают рядом особенностей и преимуществ при последующей обработке плазменных покрытий: локальностью и высокой концентрацией получаемой энергии, которая позволяет обрабатывать нужный участок нанесенного покрытия без нарушения его структуры и свойств из-за нагрева всего объема; способностью управления параметрами обработки, обеспечивающими регулирование последующей структуры обрабатываемого слоя, его шероховатости, износостойкости, твердости, необходимых геометрических размеров, значительное уплотнение слоя покрытия после обработки и соответственно снижение шероховатости и устранение пористости. Тем не менее, необходимо учитывать способность высокоэнергетической обработки к изменению и перераспределению напряжений в покрытии, тем более существенному, чем меньше толщина покрытия и выше мощность излучения, именно поэтому требуется очень серьезная оптимизация режимов обработки [9].

Современное применение металлокерамических покрытий. Вследствие применения высокотемпературных газовых струй использование газотермического напыления наиболее эффективно для нанесения покрытий из тугоплавких материалов и, в частности, из оксидов металлов и металлокерамики, которые имеют высокую прочность связи в кристаллической решетке и одновременно обладают высокой когезионной прочностью, твердостью, износостойкостью. Наиболее широкое применение для нанесения керамических покрытий, в том числе из материалов на основе оксидов, получил метод плазменного напыления. Актуальность плазменных покрытий из оксидов металлов и металлокерамики подтверждается большим количеством работ по данной тематике. До 50% работ, представленных в последнее десятилетие на основных форумах по газотермическому напылению, в той или иной мере связаны с напылением керамики или металлокерамики. Это подтверждает и номенклатура порошков для газотермического напыления, стандартно выпускаемых основными фирмами-производителями [1-6]. В работе [17] рассмотрены композиционные покрытия NiCrAlY/Al₂O₃, изготовленные методом плазменного напыления на воздухе для использования в качестве радиопоглощающих материалов. В последние годы радиопоглощающие материалы (РПМ) широко используются в коммерческих и военных целях. Радиолокационное поглощение этих материалов обычно достигается использованием композитных материалов, состоящих из частиц проводящего наполнителя с диэлектрическими и магнитными потерями, распределенными в изолирующей матрице [18]. По сравнению с радиопоглощающими структурами покрытия поглощающие микроволны обладают множеством преимуществ, таких как малоразмерность и небольшой вес, простота в использовании на наружных поверхностях самолетов и транспортных средств. В результате значительное внимание в статье уделено разработке микроволновых абсорбирующих покрытий с небольшой толщиной, низкой плотностью, широкой полосой пропускания и сильными электромагнитными абсорбционными свойствами [18]. Порошок NiCrAlY (Ni-22 мас.% Cr-10 мас.% Al-1 мас.% Y, зернистость 65 мкм) и порошок Al₂O₃ (> 99,9 мас.%, зернистость

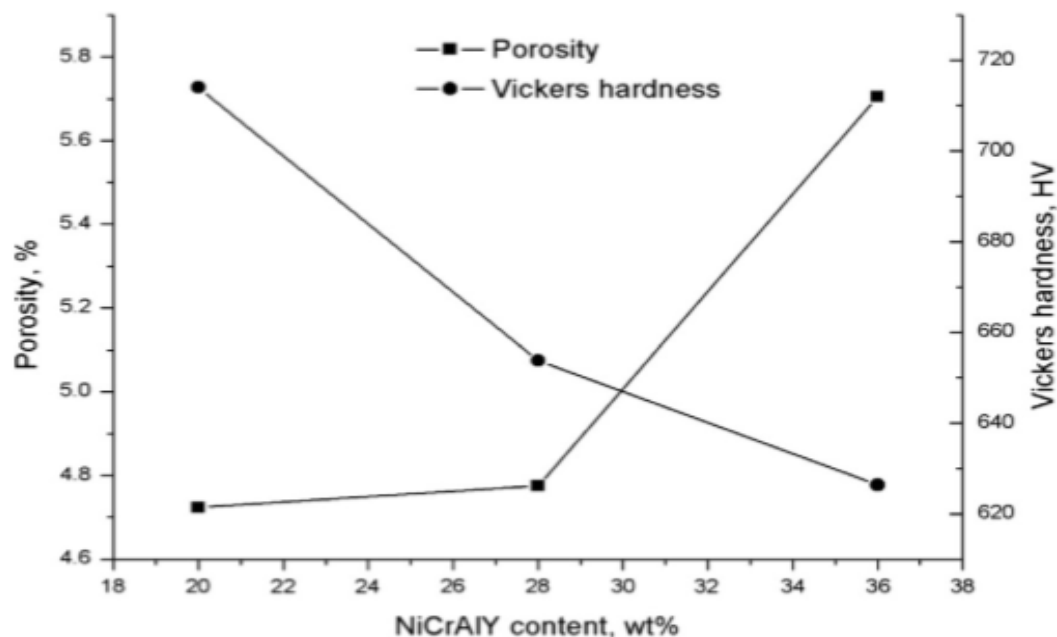


Рис. 2. Зависимость пористости и микротвердости композиционных покрытий NiCrAlY/Al₂O₃ от содержания NiCrAlY

Fig. 2. Dependence of porosity and microhardness of composite coatings of NiCrAlY/Al₂O₃ on the content of NiCrAlY

0,8 мкм) использовали в качестве исходных материалов в этом исследовании. Вследствие большего размера порошка NiCrAlY было использовано дробление частиц на более мелкие сегменты. Порошки Al₂O₃ и NiCrAlY были взяты в массовых соотношениях 80/20, 72/28 и 54/36, а затем размолоты в течение 10 ч с помощью планетарного высокоэнергетического шарового помола (QM-3sp4, Nanjing NanDa Instrument Plant) с шариками Al₂O₃ в толуоле в атмосфере газа аргона. Вследствие плохой текучести субмикронных частиц метод распылительной сушки был использован для агломерации измельченных композитных частиц. В процессе распылительной сушки порошки после измельчения готовили путем смешивания в воде с образованием суспензии. Затем смеси агломерировали с использованием центробежной распылительной сушилки. После процесса распылительной сушки гранулы диаметром от 25 до 90 мкм были отсеяны для использования в процессе плазменного напыления. На рис. 1 показаны типичные формы гранул высушенных распылением порошков с отличной текучестью, которые подходят для использования при плазменном распылении.

В работе использовалась система плазменного распыления малой мощности. Аргон и азот использовались как первичные и вторичные газы соответственно. Более подробная информация о параметрах распыления, таких как ток дуги, скорость подачи порошка и расстояние напыления, приведена в таблице 1. В процессе плазменного напыления высушенные распылением композитные порошки подавались внутрь плазмы для получения Al₂O₃ – 20 мас.% NiCrAlY, Al₂O₃ – 28 мас.% NiCrAlY и Al₂O₃ – 36 мас.% NiCrAlY соответственно. Покрытия напыляли толщиной около 4,0 мм на графитовые подложки. После нанесения они были механически удалены с подложек. Пористость покрытий составляет 4,72, 4,77 и 5,70% (рис. 2), когда содержание NiCrAlY увеличивается с 20 до 36 мас.%. Было обнаружено, что существует прямая зависимость между пористостью и содержанием NiCrAlY в композиционных покрытиях NiCrAlY/Al₂O₃. Покрытия с более высоким содержанием NiCrAlY проявляют более высокую пористость. В процессе плазменного напыления пористость обычно связана с большим количеством нерасплавленных или переплавленных частиц. Как показано на рис. 2, покрытия с большим количеством NiCrAlY проявляют более низкую твердость по Виккерсу.

Таблица 2. Параметры, используемые для плазменного напыления NiCrAlY покрытия
 Table 2. Parameters used for plasma spraying of NiCrAlY coating

Режимы напыления	Значения параметров
Ток, А	450
Напряжение дуги, В	65
Расход плазмообразующего газа (Ar), МПа	0,8
Расход плазмообразующего газа (H ₂), МПа	0,4
Дистанция напыления, мм	150
Расход транспортирующего газа (Ar), slpm	3,7
Толщина напыления, мкм	100

Таблица 3. Формула системы керамических заполнителей
 Table 3. Formula of the ceramic aggregate system

Химические компоненты	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	SiO ₂	BaSO ₄	Порошок стекла
Содержание, %	80	13	2	2	1,5	1,5

Очевидно, что твердость керамики Al₂O₃ намного выше по сравнению с металлическим NiCrAlY. Поэтому присутствие NiCrAlY в больших количествах уменьшает твердость. С другой стороны, пористость также влияет на твердость композиционных покрытий. Покрытия с более высокой пористостью будут иметь более низкую твердость. Для радиопоглощающих материалов, используемых при высокой температуре, диэлектрические потери, определяемые комплексной диэлектрической проницаемостью, являются основным механизмом потерь для поглощения падающего излучения в синхронизированных частотах и рассеивания его в виде тепла (действительная (s') и мнимая (s'') части комплексной диэлектрической проницаемости композиционных покрытий NiCrAlY/Al₂O₃). Комплексная диэлектрическая проницаемость композиционных покрытий тесно связана с массовой долей NiCrAlY. Для композитных покрытий с 20 и 28 мас.% NiCrAlY действительная (s') и мнимая (s'') практически постоянны и обычно возрастают с увеличением содержания NiCrAlY во всем диапазоне частот. В работе [19] керамическое покрытие Al₂O₃- TiO₂ и градиентное керамическое покрытие NiCrAlY/Al₂O₃- TiO₂ были приготовлены методами суспензионного распыления и методами плазменного и суспензионного распыления соответственно. Была изучена прочность связи между покрытиями и металлическими подложками, а также были проведены анализы на стойкость к тепловому удару и исследован механизм разрушения покрытий. Результаты показывают, что распыление керамических суспензий Al₂O₃ эффективно заполняет трещины, образующиеся в процессе плазменного распыления покрытий NiCrAlY, и между покрытиями и металлическими подложками образуются металлургические связи. Фазы α-Al₂O₃ и рутил TiO₂ являются основными кристаллическими структурами термостойких керамических покрытий. Константа скорости окисления покрытия NiCrAlY / Al₂O₃- TiO₂ составила 1,332×10⁻⁴ мг²см⁻⁴ч⁻¹, что показывает наилучшую стойкость к высокотемпературному окислению. Было обнаружено, что эффект высокотемпературного плавления металлического Al в связующем слое увеличивает прочность сцепления. При тех же температурных условиях покрытие NiCrAlY / Al₂O₃- TiO₂ имело более высокую прочность сцепления, чем покрытие Al₂O₃, и когда время окисления составляло 96 ч, его прочность сцепления достигала 26,9 МПа. Значение коэффициента теплового расширения связующего покрытия NiCrAlY было больше коэффициента металлической подложки и меньше коэффициента керамического верхнего покрытия, таким образом уменьшились разница коэффициентов теплового расширения между ними и скорость распространения трещин, что улучшает сопротивление тепловому удару покрытия. Комплексное исследование показало, что покрытие NiCrAlY / Al₂O₃- TiO₂ имело лучшие теплозащитные свойства для металлических подложек. Технология термобарьерных покрытий является одним из основных методов защиты металлов от высоких температур. Эта технология использует плазменное или газопламенное распыление для расплавления керамических порошков (например, ZrO₂ и Al₂O₃) и порошков металлических сплавов при высокой температуре,

расплавленные порошки затем напыляются на поверхность металлической подложки и охлаждаются для образования теплоизоляционных покрытий и защиты металлических подложек. Градиентное покрытие $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ – термостойкий материал, который широко используется из-за хорошей прочности сцепления, но, когда температура окружающей среды превышает 1150°C , процесс окисления NiCrAlY ускоряется [20]. При увеличении толщины оксидной пленки связующий слой растрескивается и отслаивается, что приводит к разрушению покрытия. В настоящее время исследования по улучшению свойств NiCrAlY в основном сосредоточены на модификации сплавов NiAl и NiCrAlY активными элементами, таких как Zr , Ru , Hf , Ta [20-26]. На основании этих исследований в данной работе был разработан новый метод подготовки покрытия. Во-первых, металлическое связующее покрытие NiCrAlY было нанесено на поверхность нержавеющей стали 304 методом плазменного напыления (табл. 2). Затем приготовили керамические суспензии путем равномерного смешивания силиката натрия и керамических наполнителей, таких как Al_2O_3 и TiO_2 , в соответствующих пропорциях. Керамические суспензии распыляли на связующее покрытие NiCrAlY , затем их спекали при температуре 800°C для получения градиентного керамического покрытия $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$. Этот метод называется методом термического химического распыления. Жидкофазные керамические суспензии заполняют отверстия и трещины, возникающие в процессе термического напыления, и улучшают характеристики теплозащитных покрытий после нанесения на связующее покрытие NiCrAlY . Этот метод становится все более популярным из-за его низких затрат, простоты технологических операций и контролируемой толщины покрытия [20-23]. В то же время для сравнительного исследования было также подготовлено неградиентное керамическое покрытие Al_2O_3 , в котором отсутствует связующее покрытие NiCrAlY . Различные керамические наполнители смешивали в пропорциях, указанных в таблице 3. Затем приготовленные смеси измельчали в шаровой мельнице в течение 6 часов, пока размер 95% частиц не достигал 45 мкм. После измельчения смешанные керамические агрегаты добавляли к раствору жидкого стекла с массовым соотношением 1:1 для получения смешанной керамической суспензии. Для диспергирования смешанной керамической суспензии в течение 4 часов со скоростью 800 об/мин использовалась многофункциональная дисперсионная мельница, пока суспензия не стала однородной и стабильной. Во время процесса диспергирования фторсиликат натрия добавляли в суспензию в качестве отвердителя до тех пор, пока его содержание не достигало 2%. Двухслойное покрытие, состоящее из нижнего слоя NiCrAlY и верхнего слоя $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ и называемое $\text{NiCrAlY}/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, было изготовлено на поверхности подготовленных образцов из нержавеющей стали в три этапа. Сначала покрытие NiCrAlY было распылено плазмой на подложку. Параметры распыления приведены в таблице 3. Когда температура поверхности покрытия NiCrAlY была снижена до комнатной температуры, был применен метод распыления суспензии для получения гомогенной пленки на поверхности покрытия NiCrAlY . На этом этапе распылитель был подключен к воздушному компрессору. Наконец, образец с покрытием помещали при комнатной температуре на 24 часа до высыхания поверхности и нагревали до 800°C в печи со скоростью нагрева $15^\circ\text{C}/\text{мин}$. Образец спекали при 800°C в течение 2 ч, а затем охлаждали до комнатной температуры в печи.

Микроструктура и морфология полученных покрытий были исследованы с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) для анализа содержания элементов в указанных областях покрытий. Рентгенограммы (XRD) покрытия регистрировали на системе дифрактометра X'Pert PRO MRD с использованием $\text{Cu-K}\alpha$. Излучение устанавливалось со скоростью сканирования $2^\circ/\text{мин}$ в диапазоне $20\text{-}80^\circ$ (2θ). Прочность сцепления покрытия измеряли в соответствии со стандартами ASTM C 633-2001 [24]. Испытание на термостойкость образца с покрытием оценивали при различных температурах (500°C , 600°C , 700°C и 800°C). Сначала образец с покрытием нагревали до указанной температуры со скоростью нагрева $15^\circ\text{C}/\text{мин}$. После выдерживания при указанной температуре в течение 10 минут образец с покрытием быстро помещали в бак с холодной водой при 25°C для охлаждения. Эту процедуру можно рассматривать как один цикл теплового удара, считалось, что разрушение покрытия происходило, когда 1/3 покрытия была отделена от металлической подложки. Кривые кинетики изотермического окисления приведены на рисунке 3 для металлической подложки, покрытия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ и покрытия $\text{NiCrAlY -Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$. Из рис. 3

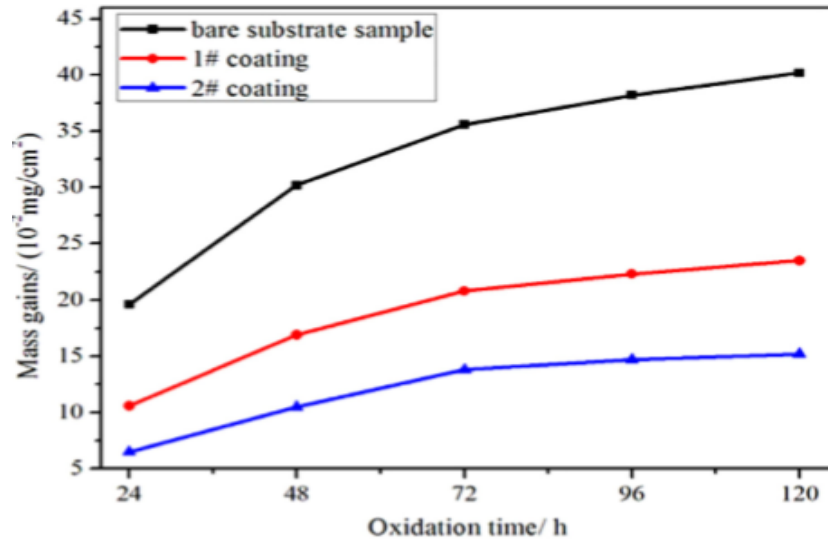


Рис. 3. Кривые кинетики изотермического окисления
 Fig. 3. Isothermal oxidation kinetics curves

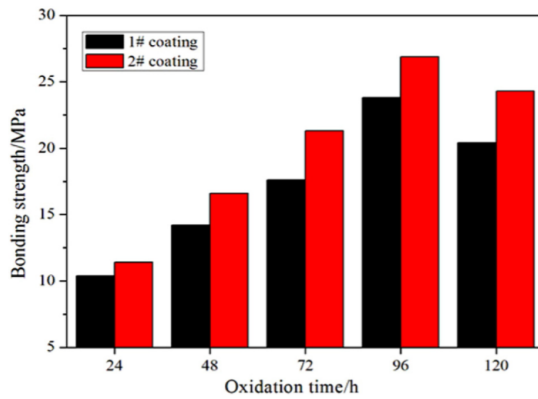


Рис. 4. Прочность сцепления покрытий после окисления при 1050°C в течение разного времени (1 - Al₂O₃-TiO₂; 2 - NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂)
 Fig. 4. Bonding strength of coatings after oxidation at 1050 °C for different times (1-Al₂O₃-TiO₂; 2- NiCrAlY-Al₂O₃-TiO₂)

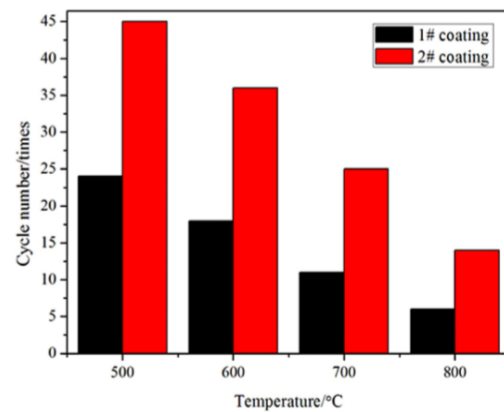


Рис. 5. Количество циклов термического удара покрытий при разных температурах (1-Al₂O₃-TiO₂; 2 - NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂)
 Fig. 5. Number of cycles of thermal shock of coatings at different temperatures (1-Al₂O₃-TiO₂; 2-NiCrAlY-Al₂O₃-TiO₂)

видно, что с увеличением времени окисления скорость увеличения массы оксида уменьшается для всех трех образцов. Константа скорости окисления металлической подложки является самой большой, за ней следует Al₂O₃-TiO₂ покрытие и NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂ покрытие. Это обусловлено различием ламинированных структур обоих покрытий. Область окисления границы раздела в основном состоит из четырех элементов: Al, Cr, Ni и O. Это происходит потому, что внешний O диффундирует в связующее покрытие NiCrAlY и создает оксидные пленки, такие как Al₂O₃, NiO и Cr₂O₃. Эти пленки покрывают поверхность подложки, чтобы предотвратить дальнейшее проникновение кислорода, и улучшают стойкость покрытия к высокотемпературному окислению. Высокотемпературное окисление двух покрытий проводили при 1050°C в течение 24, 48, 72, 96 и 120 часов. Прочность сцепления между покрытием и металлической подложкой измеряли после охлаждения образцов до комнатной температуры с использованием универсальной испытательной машины. Результаты показаны на рисунке 4. Из рис. 4 видно, что прочность соединения покрытия постепенно увеличивается со временем окисления.

На рис. 5 показано количество циклов термоударов, выдерживаемых покрытиями при различных температурах. Из рисунка видно, что чем ниже температура, тем большее число циклов теплового удара выдерживают покрытия. NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂ покрытие демонстрирует лучшую стойкость к тепловому удару, что свидетельствует о демпфирующем эффекте

связующего покрытия NiCrAlY между керамическим верхним покрытием и металлической подложкой. Поскольку существуют большие различия между коэффициентами теплового расширения керамических материалов и металлической подложки, во время циклического процесса нагрева и охлаждения степени линейного расширения этих двух элементов не одинаковы, это приводит к различным условиям напряжения поверхностей раздела покрытий. В частности, коэффициент теплового расширения металлической подложки намного больше, чем у керамического покрытия; следовательно, изменения объема металлической подложки относительно велики. На этапе нагрева на керамическое верхнее покрытие воздействует напряжение растяжения, а на металлическую подложку – напряжение сжатия. На стадии охлаждения на керамическое верхнее покрытие воздействует напряжение давления, а на металлическую подложку – усталостное напряжение. Циклические изменения в процессе нагрева и охлаждения приводят к периодически меняющемуся напряжению внутри покрытия, то есть к циклическому напряжению. Поскольку керамический материал имеет определенный предел усталостной прочности, в покрытии образуются трещины, когда циклическое напряжение превышает предел усталостной прочности материала. После образования трещины хрупкое керамическое покрытие мало влияет на предотвращение распространения трещин, и трещина будет быстро расширяться до тех пор, пока покрытие не будет отслаиваться. По сути, разрушение покрытия от теплового удара является усталостным разрушением под действием циклического напряжения, которое происходит в три этапа: образование трещин, расширение и окончательное отслаивание [29-33]. Согласно вышеупомянутым анализам, основной причиной разрушения керамического покрытия из-за теплового удара является растягивающее напряжение, возникающее в результате внезапных изменений температуры и последующих повреждений поверхности. Это исследование объединило технологию плазменного напыления и технологию напыления суспензии, для приготовления градиентного покрытия NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂ на поверхности подложек из нержавеющей стали. В то же время покрытие Al₂O₃-TiO₂ было также приготовлено методом распыления суспензии для сравнительного анализа. Основные выводы можно резюмировать следующим образом:

1. Распыление керамических суспензий Al₂O₃-TiO₂ заполняет трещины и зазоры, керамические агрегаты связываются в пленку системы распыления силикатов, и на поверхности покрытия не образуются трещины и отверстия.

2. В покрытии NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂ превращение анатаза в рутиловую фазу TiO₂ происходит во время спекания и затвердевания, и α-Al₂O₃ и рутиловый TiO₂ составляют кристаллическую фазовую структуру керамических покрытий.

3. После окисления при 1050°C в течение 120 часов покрытие NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂ демонстрирует самую низкую константу скорости окисления, а именно $1,332 \times 10^{-4}$ мг² см⁻⁴ ч⁻¹, и наилучшую стойкость к высокотемпературному окислению.

4. При той же температуре покрытие NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂ имеет более высокую прочность сцепления, чем покрытие Al₂O₃-TiO₂; после того, как покрытие было окислено при 1050°C в течение 96 часов, оно достигает максимальной прочности склеивания – 26,9 МПа. Испытания на термический удар показывают, что связующий слой NiCrAlY в покрытии NiCrAlY -Al₂O₃-TiO₂ образует градиентную структуру, которая обеспечивает постепенное распространение трещин и повышает стойкость покрытия к тепловому удару. В источнике [34] слои NiCrAlY, содержащие различные количества Al₂O₃ (0, 3, 6, 12, 18 мас.%), наносились на подложки из нержавеющей стали с помощью «гибридного» плазменного распыления, при котором порошок NiCrAlY подавался в сухом виде, в то время как мелкодисперсный порошок Al₂O₃ диспергировался в этанол и вводился через систему подачи суспензии. Покрытия для долговременной защиты механических компонентов от сильного износа скольжения при высоких температурах широко используются в различных областях промышленности, в первую очередь в области производства энергии, для защиты валов и подшипников в авиационных и наземных газовых турбинах [35], деталей паровых турбин [36] и компонентов для атомных электростанций [37-42] и т. д. Однако в настоящее время эта проблема полностью не решена. Твердые материалы, особенно карбиды хрома (например, Cr₃C₂-NiCr), довольно широко используются [35-39], но они имеют ряд недостатков. Из-за их высокой твердости обработка этих

Таблица 4. Параметры процесса плазменного напыления
 Table 4. Parameters of the plasma deposition process

NiCrAlY	Диаметр анодного сопла [мм]	6.5
	Ток [А]	450
	Напряжение [В]	103.4
	Тип первичного газа / скорость потока (расход) (SL / мин)	Ar/70
	Энтальпия плазмы [МДж / кг]	12.8
	Дистанция напыления [мм]	100
	Температура предварительного нагрева подложки [°С]	200-250
	Количество циклов предварительного нагрева	20
Al ₂ O ₃	Диаметр порошкового инжектора [мм]	1.8
	Скорость подачи порошка [г / мин]	10-35
	Расход подаваемого газа [SL / мин]	7
	Давление нагнетания [МПа]	0.6
	Содержание твердого вещества в суспензии (мас.%)	10-40
	Скорость подачи суспензии [мл / мин]	30

покрытий трудоемка и дорога. Они также обладают неоптимальной стойкостью к окислению при высоких температурах из-за внутренней диффузии кислорода через частицы карбида хрома и, следовательно, из-за их избирательной деградации [40]. Лучших характеристик в окислительных средах можно достичь с помощью систем на основе сплавов типа MCrAlY (где M = Co и / или Ni), которые соответственно используются для предотвращения окисления и горячей коррозии лопаток турбин, других компонентов секций газовых турбин до 1100°С [41]. В большинстве цитируемых ссылок композиты MCrAlY - Al₂O₃ наносились с помощью процессов термического напыления. Их основные преимущества включают высокую производительность и применение большого количества материалов для покрытий и подложек [42-48]. Они наиболее часто применяются для нанесения стойких к окислению сплавов MCrAlY [41]. Все образцы были изготовлены методом плазменного напыления в атмосфере с использованием горелки TriplexPro-200 (Oerlikon-Metco, Wohlen, Швейцария) с тремя катодами и одним анодным соплом. Исходным сырьем для матрицы MCrAlY стандартный порошок Ni - 22 мас. % Cr - 10 мас.% Al - 1 мас.% Y (AMDRY 9624, Oerlikon-Metco) с номинальным гранулометрическим составом – 45 + 15 мкм, который традиционно подавали на факел в сухом виде. Исходным материалом для армирования Al₂O₃ был субмикрометрический порошок (АКР-30, Sumitomo Chemicals Co., Япония) со средним размером частиц 300 нм. Поскольку мелкие частицы обладают недостаточной текучестью и недостаточным импульсом для обычной подачи в поток плазмы с использованием газового носителя, порошок диспергировали в среде этанола с помощью 2 мас.% диспергатора (Beicostat C213) и подавали с использованием системы доставки жидкости на основе резервуаров под давлением. Суспензия подается через инжектор с сапфировым соплом диаметром 150 мкм. Инжектор наклонен под углом 70° относительно оси горелки и расположен таким образом, что поток суспензии направлен к центру выхода из сопла анода. Параметры напыления NiCrAlY и Al₂O₃ приведены в табл. 4. Чтобы изменить относительные количества матрицы NiCrAlY и материала для армирования Al₂O₃ в покрытиях, скорость подачи порошка NiCrAlY и содержание твердого вещества в суспензии варьировали. Цель настоящего исследования состояла в том, чтобы проанализировать характеристики различных покрытий в зависимости от температуры и содержания Al₂O₃, а также дать общее представление об их основных характеристиках износа скольжения.

Выводы.

На основе анализа современного применения и особенностей металлокерамических плазменных покрытий можно констатировать, что данные композиции (оксид-металлическая составляющая) используются в качестве диэлектрических, теплозащитных и износостойких

покрытий. Предлагаемое нами направление исследований касается технологии нанесения износостойких покрытий для восстановления и упрочнения деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся при неблагоприятных условиях граничной смазки или в отсутствие смазочного материала, при повышенных нагрузках и колебаниях температур (моторостроение, металлургическое оборудование, авиационная и космическая техника). Согласно результатам проведенного обзора для таких условий эффективны упрочненные газотермические покрытия, содержащие твердые тугоплавкие соединения. Указанные покрытия наносят плазменным напылением с последующей высокоэнергетической обработкой импульсами компрессионной плазмы (лазерного излучения). К факторам износостойкости в данном случае относится состав композиционных частиц исходных порошков, обеспечивающий эффективную структуру покрытий. Кроме того, высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий обеспечивает их упрочнение за счет уплотнения и формирования измельченной (нанокристаллической), неравновесной (аморфной) структуры при сверхбыстром охлаждении оплавленных слоев толщиной 30-100 мкм. Вместе с тем для окончательных выводов и решений, направленных на успешное внедрение упомянутых покрытий, целесообразно изучить перспективы синтеза новых композиционных порошков из керамики с применением добавок тугоплавких металлов и разработать критерии прогнозирования свойств покрытий из них, полученных плазменным напылением; исследовать и оптимизировать технологические параметры плазменного напыления композиционных порошков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricants // *Welding production-M.*, 2002. – №6. – С.41-43.
2. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V. Okovity // *J. Welding International* – 2003. – vol.16, № 11. – P. 918-920.
3. Okovity, V.A. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.I. Shevtsov, V.V. Okovity, V.M. Astashinsky, E.A. Kostyukevich // *High Temperature Material Processes* 18(1-2), 45-62 (2014).
4. Okovity, V.A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.F. Panteleenko // *Processing of metals*. – Novosibirsk, 2015. – №2 (67) – P.46-54.
5. Okovity, V.A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V.A. Okovity, F.I. Panteleenko, V.M. Astashinsky, V.V. Bruised // “*Science and Technology*”, BNTU – Minsk. – 2018. Issue 3. – P.183-189.
6. Vityaz, P.A. Theory and practice of applying protective coatings / P.A. Vityaz, V.S. Ivashko, A.F. Ilyuschenko, A.I. Shevtsov, E.D. Manoilo. – Minsk, 1998.
7. Vityaz, P.A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heat-protective coatings / P.A. Vityaz, A.F. Ilyuschenko, A. I. Shevtsov. – Minsk: Belarusian. Science, 2006. – P.205-243, 280-300, 314-351.
8. Ilyuschenko, A.F. Plasma coatings based on ceramic materials / A.F. Ilyuschenko, V.A. Okovity, A.I. Shevtsov. – Minsk: Besprint, 2006. – 316 p.
9. Асташинский, В.М. Получение и исследование элементов экранной противометеорной защиты на основе многослойных композиционных плазменных покрытий NiAl-Al₂O₃/ В.М. Асташинский, П.П. Храмцов, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Оковитый, В.В. Оковитый// *Труды международного форума «15 минский международный форум по тепломассообмену»*, Минск, 23-26 мая 2016. – С.40-44.
10. Ильющенко, А.Ф. Формирование газотермических покрытий: теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек – Минск: Беспринт, 2002. – 480 с.
11. Ильющенко, А.Ф. Теплозащитные покрытия на основе ZrO₂/ А.Ф. Ильющенко, В.С. Ивашко, В.А. Оковитый, С.Б. Соболевский. – Минск: Ремика, 1998. – 128 с.
12. Достанко, А.П. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / А.П.Достанко, А.Ф.Ильющенко, С.П. Кундас. – Минск.: Армита – Менеджмент, 1999. – 436 с.
13. Современные технологии нанесения теплозащитных керамических покрытий / В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый и др.// *Известия Белорусской инженерной академии* – 1997. № 2(4). – С. 28-32.
14. Оковитый, В.В. Технологические особенности формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония /Оковитый В.В., Девойно О.Г., Оковитый В.А., Асташинский В.М. // “*Наука и техника*” БНТУ, 2016. – Вып.3. – С. 193-199.

15. Оковитый, В.А. Формирование и исследование многослойных композиционных оксидных плазменных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты/ Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Девойно О.Г., Оковитый В.В., Асташинский В.М., Храмцов П.П. и др.// “Наука и техника” БНТУ, 2016. – С.270-276.
16. Пантелеенко, Ф.И. Разработка технологии нанесения плазменных композиционных покрытий на основе диоксида циркония для систем космических аппаратов / Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Асташинский В.М., Оковитый В.В., Соболевский С.Б.// “Наука и техника”, БНТУ – Минск, 2015. – Вып.3. – С. 5-17.
17. Микроволновые диэлектрические свойства малоэнергетических композитных покрытий NiCrAlY/Al₂O₃ с плазменным напылением Liang Zhou Wancheng Zhou, Fa Luo, Jinbu Su, Dongmei Zhu, Yanli Dong., Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6040-6054.
18. Никола Боулер, IEEE Trans. Dielectr. Электр. Insul. 13 (2006) 703.
19. Теплозащитные свойства градиентного керамического покрытия NiCrAlY/Al₂O₃ изготовлены методом плазменного напыления и распыления суспензии Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 5819-5824.
20. V.K. Tolpygo, D.R. Clarke, Surface rumpling of a (Ni, Pt) Al bond coat induced by cyclic oxidation, Acta Mater. 48 (2000) 3283-3293.
21. B. Tryon, K.S. Murphy, J.Y. Yang, et al., Hybrid intermetallic Ru/Pt-modified bond coatings for thermal barrier systems, Surf. Coat. Technol. 202 (2012) 349-361.
22. S. Hamadi, M.P. Bacos, M. Poulain, et al., Oxidation resistance of a Zr-doped NiAl coating thermally deposited on a nickel-based super alloy, Surf. Coat. Technol. 204 (2013) 756-760.
23. U. Schulz, M. Menzabach, C. Leyens, et al., Influence of substrate material on oxidation behavior and cyclic lifetime of EB-PVD TBC systems, Surf. Coat. Technol. 146 (2014) 117-123.
24. J.G. Gao, Y.D. He, D.R. Wang, Fabrication and high temperature oxidation resistance of ZrO₂/Al₂O₃ micro laminated coatings on stainless steel, Mater. Chem. Phys. (2010) 731-736.
25. S. Sathish, M. Geetha, Comparative study on corrosion behavior of plasma sprayed Al₂O₃, ZrO₂, Al₂O₃/ZrO₂, ZrO₂/Al₂O₃ coatings, Trans. Nonferrous Metals Soc. China 26 (2016) 1336-1344.
26. X. Shan, L.Q. Wei, X.M. Zhang, W.H. Li, W.X. Tang, Y. Liu, J. Tong, S.F. Ye, Y.F. Chen, A protective ceramic coating to improve oxidation and thermal shock resistance on CrMn alloy at elevated temperatures, Ceram. Int. 41 (2015) 4706-4713.
27. Микроструктурные исследования стабилизированных NiCrAlY - Y₂O₃ керметных покрытий ZrO₂, нанесенных плазменной дугой (ПТА), Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6057-6074.
28. X. Sun, S. Chen, Y. Wang, Z. Pan, L. Wang, Mechanical properties and thermal shock resistance of HVOF sprayed NiCrAlY coatings without and with nano ceria, J. Therm. Spray Technol. 21 (5) (2012) 818-824.
29. L. Zhou, W. Zhou, F. Luo, J. Su, D. Zhu, Y. Dong, Microwave dielectric properties of low power plasma sprayed NiCrAlY/Al₂O₃ composite coatings, Surf. Coat. Technol. 210 (2012) 122-126.
30. J.H. Lee, D.B. Lee, Hot corrosion of NiCrAlY/(ZrO₂-CeO₂-Y₂O₃) composite coatings in NaCl-Na₂SO₄ molten salt, Mater. Sci. Forum 658 (2010) 228-231.
31. C. Zhu, Y.G. Wang, L.N. An, A. Javed, P. Xiao, G.Y. Liang, Microstructure and oxidation behavior of conventional and pseudo graded NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings produced by supersonic air plasma spraying process, Surf. Coat. Technol. (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.014>.
32. D.B. Lee, C. Lee, High-temperature oxidation of NiCrAlY/ (ZrO₂-Y₂O₃ and ZrO₂- CeO₂-Y₂O₃) composite coatings, Surf. Coat. Technol. 193 (2005) 239242.
33. A.M. Khoddami, A. Sabour, S.M.M. Hadavi, Microstructure formation in thermally sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-stabilized zirconia coatings, Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6019-6024.
34. Трибология композиционных покрытий NiCrAlY -Al₂O₃ полученных методом плазменного напыления с гибридной подачей сухого порошка -суспензии., Surf. Coat. Technol. 201 (2007) 6030-6044.
35. J.R. Davis, Handbook of Thermal Spray Technology, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2004.
36. B.S. Mann, B. Prakash, High temperature friction and wear characteristics of various coating materials for steam valve spindle application, Wear 240 (2000) 223-230.
37. R.N. Johnson, Wear resistant coatings for reactor components in liquid sodium environments, J. Vac. Sci. Technol. 11 (1974) 759.
38. C.C. Li, Characterization of thermally sprayed coatings for high temperature wear protection applications, Thin Solid Films 73 (1980) 59-77.
39. W.J. Bryan, D. Jones. Wear resistant coating for components of fuel assemblies and control assemblies, and method of enhancing wear resistance of fuel assembly and control assembly components using wear-resistant coating, US Patent No. 5,434,896, 1995.
40. S. Matthews, B. James, M. Hyland, High temperature erosion-oxidation of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions, Corros. Sci. 70 (2013) 203-211.
41. S. Bose, High Temperature Coatings, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2007.

REFERENCES

1. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with the inclusion of solid lubricants // *Welding production-M.*, 2002. – №6. – С.41-43.
2. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V. Okovity // *J. Welding International* – 2003. – vol.16, № 11. – P. 918-920.
3. Okovity, V.A. Paramets optimization for plasma spraying and pulsed plasma treatment of surface layers of gas-thermal composite coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.I. Shevtsov, V.V. Okovity, V.M. Astashinsky, E. A. Kostyukevich // *High Temperature Material Processes* 18(1-2), 45-62 (2014).
4. Okovity, V.A. Optimization of the process of spraying wear-resistant coatings based on multifunctional oxide ceramics / V.A. Okovity, A.F. Panteleenko // *Processing of metals*. – Novosibirsk, 2015. – №2 (67) – P.46-54.
5. Okovity, V.A. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a nonequilibrium structure / V.A. Okovity, F.I. Panteleenko, V.M. Astashinsky, V.V. Bruised // “*Science and Technology*”, BNTU – Minsk. – 2018. Issue 3. – P.183-189.
6. Vityaz, P.A. Theory and practice of applying protective coatings / P.A. Vityaz, V.S. Ivashko, A.F. Ilyushchenko, A.I. Shevtsov, E.D. Manoilo. – Minsk, 1998.
7. Vityaz, P.A. Basics of application of wear-resistant, corrosion-resistant and heat-protective coatings / P.A. Vityaz, A.F. Ilyushchenko, A. I. Shevtsov. – Minsk: Belarusian. Science, 2006. – P.205-243, 280-300, 314-351.
8. Ilyushchenko, A.F. Plasma coatings based on ceramic materials / A.F. Ilyushchenko, V.A. Okovity, A.I. Shevtsov. – Minsk: Besprint, 2006. – 316 p.
9. Astashynski, V. M. Preparation and study of the elements of the display protivooterne protection based on multi-layer composite plasma coating NiAl-Al₂O₃/ V.M. Astashinskii, P.P. Khrantsov, F.I. Panteleenko, V.A. Okovity, V.V. Okovity// *Proceedings of the international forum"15 Minsk international forum on heat and mass transfer" Minsk, 23 may, 2016 Pp. 40-44.*
10. Ilyushchenko, A.F. Formation of thermal spray coatings: theory and practice / F. A. Ilyushchenko, V.A. Okovity, S. P. Kundas, B. Formanek – Minsk: Besprint, 2002. – 480 p.
11. Ilyushchenko, A.F. Heat-protective coatings based on ZrO₂/ A.F. Ilyushchenko, V.S. Ivashko, V.A. Okovity, S.B. Sobolevsky – Minsk: Remika, 1998. – 128 p.
12. Dostanko, A.P. Processes of plasma coating: theory and practice / A.P. Dostanko, A.F. Ilyushchenko, S.P. Kundas – Minsk.: Armita-Management, 1999. – 436 p.
13. Modern technologies for applying heat-protective ceramic coatings / V.S. Ivashko, A.F. Ilyushchenko, V.A. Okovityi, etc. // *Izvestiya Belorusskaya tekhninernoy akademii* – 1997. No. 2(4). pp. 28-32.
14. Okovity, V.V. Technological features of the formation of heat-protective coatings based on zirconium dioxide /Okovity V.V., Devoino O.G., Okovity V.A., Astashinsky V.M. // "Science and Technology" BNTU, 2016. – Issue.3. – p. 193-199.
15. Okovity, V.A. Formation and research of multilayer composite oxide plasma coatings on elements of screen anti-meteor protection / Okovity V.A., Panteleenko F.I., Devoino O.G., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Khrantsov P.P., et al. / "Nauka i tekhnika" BNTU, 2016. – pp. 270-276.
16. Panteleenko, F.I. Development of technology for applying plasma composite coatings based on zirconium dioxide for spacecraft systems // Panteleenko, F.I., Okovity, V.A., Devoino, O.G., Astashinsky, V.M., Okovity, V.V., Sobolevsky, S.B. // "Science and Technology", BNTU-Minsk, 2015. – 3. – p. 5-17.
17. Microwave dielectric properties of low-energy composite coatings NiCrAlY / Al₂O₃ with plasma deposition Liang Zhou Wancheng Zhou, Fa Luo, Jinbu Su, Dongmei Zhu, Yanli Dong., *Surf. Coat. Technol.* 201 (2007) 6040-6054.
18. Nicola Bowler, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 13 (2006) 703.
19. Thermal protection properties of the gradient ceramic coating NiCrAlY / Al₂O₃ are made by plasma spraying and suspension spraying, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2007) 5819-5824.
20. V.K. Tolpygo, D.R. Clarke, Surface rumpling of a (Ni, Pt) Al bond coat induced by cyclic oxidation, *Acta Mater.* 48 (2000) 3283-3293.
21. B. Tryon, K.S. Murphy, J.Y. Yang, et al., Hybrid intermetallic Ru/Pt-modified bond coatings for thermal barrier systems, *Surf. Coat. Technol.* 202 (2012) 349-361.
22. S. Hamadi, M.P. Bacos, M. Poulain, et al., Oxidation resistance of a Zr-doped NiAl coating thermos chemically deposited on a nickel-based super alloy, *Surf. Coat. Technol.* 204 (2013) 756-760.
23. U. Schulz, M. Menzabach, C. Leyens, et al., Influence of substrate material on oxidation behavior and cyclic lifetime of EB-PVD TBC systems, *Surf. Coat. Technol.* 146 (2014) 117-123.
24. J.G. Gao, Y.D. He, D.R. Wang, Fabrication and high temperature oxidation resistance of ZrO₂/Al₂O₃ laminated coatings on stainless steel, *Mater. Chem. Phys.* 123 (2010) 731-736.
25. S. Sathish, M. Geetha, Comparative study on corrosion behavior of plasma sprayed Al₂O₃, ZrO₂, Al₂O₃/ZrO₂, ZrO₂/Al₂O₃ coatings, *Trans. Nonferrous Metals Soc. China* 26 (2016) 1336-1344.

26. X. Shan, L.Q. Wei, X.M. Zhang, W.H. Li, W.X. Tang, Y. Liu, J. Tong, S.F. Ye, Y.F. Chen, A protective ceramic coating to improve oxidation and thermal shock resistance on CrMn alloy at elevated temperatures, *Ceram. Int.* 41 (2015) 4706-4713.
27. Microstructural studies of NiCrAlY - Y₂O₃-stabilized ZrO₂ cermet coatings deposited by plasma arc (PTA), *Surf. Coat. Technol.* 201 (2007) 6057-6074.
28. X. Sun, S. Chen, Y. Wang, Z. Pan, L. Wang, Mechanical properties and thermal shock resistance of HVOF sprayed NiCrAlY coatings without and with nano ceria, *J. Therm. Spray Technol.* 21 (5) (2012) 818-824.
29. L. Zhou, W. Zhou, F. Luo, J. Su, D. Zhu, Y. Dong, Microwave dielectric properties of low power plasma sprayed NiCrAlY/Al₂O₃ composite coatings, *Surf. Coat. Technol.* 210 (2012) 122-126.
30. J.H. Lee, D.B. Lee, Hot corrosion of NiCrAlY/(ZrO₂-CeO₂-Y₂O₃) composite coatings in NaCl-Na₂SO₄ molten salt, *Mater. Sci. Forum* 658 (2010) 228-231.
31. C. Zhu, Y.G. Wang, L.N. An, A. Javed, P. Xiao, G.Y. Liang, Microstructure and oxidation behavior of conventional and pseudo graded NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings produced by supersonic air plasma spraying process, *Surf. Coat. Technol.* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.04.014>.
32. D.B. Lee, C. Lee, High-temperature oxidation of NiCrAlY/ (ZrO₂-Y₂O₃ and ZrO₂- CeO₂-Y₂O₃) composite coatings, *Surf. Coat. Technol.* 193 (2005) 239-242.
33. A.M. Khoddami, A. Sabour, S.M.M. Hadavi, Microstructure formation in thermallysprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-stabilized zirconia coatings, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2007) 6019-6024.
34. Tribology of composite coatings NiCrAlY -Al₂O₃ obtained by plasma spraying with a hybrid feed of dry powder-suspension., *Surf. Coat. Technol.* 201 (2007) 6030-6044.
35. J.R. Davis, *Handbook of Thermal Spray Technology*, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2004.
36. B.S. Mann, B. Prakash, High temperature friction and wear characteristics of various coating materials for steam valve spindle application, *Wear* 240 (2000) 223-230.
37. R.N. Johnson, Wear resistant coatings for reactor components in liquid sodium environments, *J. Vac. Sci. Technol.* 11 (1974) 759.
38. C.C. Li, Characterization of thermally sprayed coatings for high temperature wear protection applications, *Thin Solid Films* 73 (1980) 59-77.
39. W.J. Bryan, D. Jones, Wear resistant coating for components of fuel assemblies and control assemblies, and method of enhancing wear resistance of fuel assembly and control assembly components using wear-resistant coating, US Patent No. 5,434,896, 1995.
40. S. Matthews, B. James, M. Hyland, High temperature erosion-oxidation of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions, *Corros. Sci.* 70 (2013) 203-211.
41. S. Bose, *High Temperature Coatings*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2007.

Библиографическое описание статьи

Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Сидоров В.А., Оковитый В.В., Асташинский В.М. Обзор современного применения металлокерамических покрытий // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2021. – № 3 (145). – С. 5-17.

Reference to article

Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M. Overview of modern ceramic coating applications. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2021, no.3 (145), pp. 5-17.