

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 621.793.7:621.762

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-45-55

ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С КЕРАМИКОЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ. ЧАСТЬ 1

Пантелеенко Федор Иванович¹, Девойно Олег Георгиевич¹,
Оковитый Василий Вячеславович¹, Блюменштейн Валерий Юрьевич²

¹ Белорусский национальный технический университет

² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* e-mail: panteleyenkof@tut.by



Информация о статье

Поступила:

30 декабря 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 мая 2026 г.

Принята к публикации:

11 июня 2026 г.

Опубликована:

29 июня 2026 г.

Ключевые слова:

композиционный материал,
никель-хром-алюминий-
иттрий, оксидная керамика,
плазменное напыление,
долговечность и надежность
механизмов, скорость нагрева
порошковых частиц,
диффузия расплавленных
солей, горячая коррозия

Аннотация.

В статье приведен обзор современного применения композиционных материалов на основе систем никелевых сплавов с керамикой для формирования многослойных композиционных плазменных покрытий. Металлические сплавы на основе материала $M\text{CrAlY}$ очень часто применяются как функциональное внешнее покрытие или связующее покрытие при процессе плазменного напыления и весьма полезны при защите поверхностей от разрушения при высокотемпературном воздействии на компонентах эксплуатируемых деталей. Новая область использования данных покрытий может быть получена путем добавления частиц новых материалов к базовой металлической матрице $M\text{CrAlY}$ для создания композиционных покрытий. Газотермические композиционные покрытия $M\text{CrAlY}$ с усиленными функциональными свойствами из-за добавления армирующих элементов, таких как иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ) ($\text{ZrO}_2\text{-}8\text{Y}_2\text{O}_3$), CeO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, Al_2O_3 , диоксид циркония (CSZ) ($\text{ZrO}_2\text{-}25\text{CeO}_2\text{-}2,5\text{Y}_2\text{O}_3$), характеризуются повышенными механическими свойствами, коррозионной и термической стойкостью. Однако недостаточная прочностная связь между оксидами и металлической матрицей, формирование трещин, сколы, пористость являются характерными недостатками у газотермически напыленных покрытий. Для уменьшения этих дефектов и улучшения прочностных характеристик покрытия применяются различные варианты последующей высокоэнергетической обработки с помощью лазера или компрессионной плазмы. Добавление оксидной керамики со стабилизацией редкоземельными элементами (РЗЭ) в покрытиях $M\text{CrAlY}$ может значительно улучшить как износостойкость, так и коррозионную стойкость покрытий. РЗЭ, будучи поверхностно-активными элементами, снижают поверхностное натяжение и межфазную энергию между ядром кристалла и расплавом в процессе затвердевания, что приводит к улучшению смачивающих свойств и уменьшению краевого угла между расплавом и подложкой. В последние годы редкоземельные элементы успешно применялись для изменения поверхностных свойств покрытий, наносимых методом термического напыления. Добавление РЗЭ в покрытия приводит к измельчению зерен и очистке границ зерен, что увеличивает микротвердость и износостойкость покрытий, снижает коэффициент трения.

Для цитирования: Пантелеенко Ф. И., Девойно О. Г., Оковитый В. В., Блюменштейн В. Ю. Обзор современного применения композиционных материалов на основе систем никелевых сплавов с керамикой для формирования многослойных композиционных плазменных покрытий. Часть 1 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 45-55. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-45-55, EDN: QEOPQ

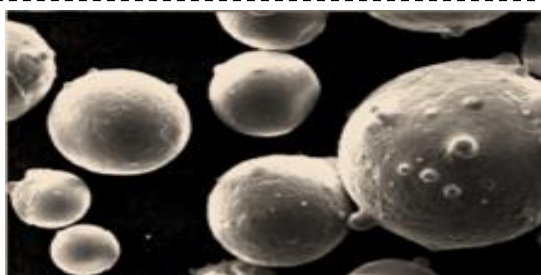
Введение

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 вакууме. Наиболее перспективными для работы в таких условиях являются композиции, которые состоят из металлокерамической матрицы и равномерно распределенной в ней оксидной составляющей. Работоспособность таких композиций обеспечивается высокими прочностными свойствами металлокерамической матрицы. Постоянное воспроизведение данного слоя при работе в условиях трения, равномерно распределенное по всему объему материала, создает нужный эффект самосмазываемости. Все вышеперечисленные особенности позволяют предполагать, что плазменные износостойкие порошковые покрытия, как защитные, так и антифрикционные, найдут широкое применение в технике. 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 Al_2O_3 , ZrO_2 и других, которые трудно расплавить с помощью традиционных процессов термического напыления. По сравнению с керамическим

покрытий может быть существенно повышена путем дальнейшего модифицирования их структуры при последующей высокоэнергетической обработке. 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; значительным уплотнением слоя покрытия после обработки и, соответственно, снижением шероховатости и устранением 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.

Обзор современного применения композиционных материалов

В работе [1] процесс формирования покрытий с помощью плазменной наплавки (РТА) был использован для создания защитных металлокерамических покрытий, в материал NiCrAlY был добавлен порошок частично стабилизированного иттрием диоксида циркония (YSZ) с двумя разными размерами частиц для создания керметных покрытий. Металлические



а



б

Рис. 1. СЭМ-микрофотографии порошковых материалов, из которых формировалось покрытие: а) порошок MMC NiCrAlY; б) порошок YSZ с гранулометрией 22–45 мкм

Fig. 1. SEM micrographs of powder materials from which the coating was formed: a) MMS NiCrAlY powder; b) YSZ powder with a granulometry of 22–45 μm

плазменным покрытием керметные, состоящие из керамических частиц, связанных с металлическими частицами, проявляют превосходную стойкость к тепловому удару в высокотемпературной атмосфере, также они обладают совместными преимуществами керамики и металла, такими как твердость и ударная вязкость. Кроме того, эффективность

сплавы на основе материала MCrAlY очень часто применяются как функциональное внешнее покрытие или связующее покрытие при процессе плазменного напыления и весьма полезны при защите поверхностей от разрушения при высокотемпературном воздействии на компоненты газовых турбин в авиационных двигателях. Новая область использования

данных покрытий может быть получена путем добавления частиц новых материалов к базовой металлической матрице MCrAlY для создания композиционных покрытий. Газотермические композиционные покрытия MCrAlY с усиленными функциональными свойствами из-за добавления армирующих элементов, таких как иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ) ($ZrO_2-8Y_2O_3$) [2], CeO_2 [3], $Al_2O_3-TiO_2$ [3], Al_2O_3 [4], диоксид циркония (CSZ) ($ZrO_2-25CeO_2-2,5Y_2O_3$) [5], характеризуются повышенными механическими свойствами, коррозионной и термической стойкостью. Однако недостаточная прочностная связь между оксидами и металлической матрицей, формирование трещин, сколы, пористость являются характерными недостатками у газотермически напыленных покрытий. Для уменьшения этих дефектов и улучшения прочностных характеристик покрытия применяются различные варианты последующей высокоэнергетической обработки с помощью лазера или компрессионной плазмы. В данной работе исследованы покрытия из композиционных материалов на основе MMC-металлической матрицы, нанесенной методом плазменной наплавки (ПТА). Композитные материалы были изготовлены из механических смесей YSZ (ZrO_2-13 мас. % Y_2O_3), имеющих разные показатели объемных концентраций с включением в матрицу NiCrAlY. Морфологии и структуры композиционных покрытий анализировались с использованием энергодисперсионной спектроскопии, дифракции рентгеновских лучей и микроскопических наблюдений. Механические свойства у MMC-покрытий оценивались по параметрам микротвердости. Порошковый материал NiCrAlY, применяемый в качестве матрицы, является собой распыленный при помощи инертного газа порошок (Рис. 1а) с гранулометрией 45–125 мкм. В качестве материала наполнителя применяли порошок ZrO_2-13 мас. % Y_2O_3 с гранулометрией 22–45 мкм (Рис. 1б) и 5–22 мкм. MMC-порошки были изготовлены при использовании процесса механического смешения двух порошков с использованием: а) YSZ с распределением 22–45 мкм (10 и 30 об. % в смеси); и б) YSZ с распределением 5–22 мкм (20 об. % в смеси) с порошком MMC NiCrAlY.

Порошок ZrO_2-13 мас. % Y_2O_3 добавляли к металлической матрице NiCrAlY для уменьшения теплопроводности покрытий. Изменение концентрации у Y_2O_3 стабилизирует диоксид циркония в разных кристаллических фазах. Смеси смешивали и сушили при температуре около $120^\circ C$ в течение 24 часов.

В статье [6] было изучено

высокотемпературное окислительное поведение покрытий NiCrAlY с добавлением оксида церия, нанесенных методом HVOF на суперсплавы. Современные промышленные газовые турбины эксплуатируются при температуре газа на входе до $1400^\circ C$, как и авиационные двигатели, для достижения максимальной эффективности и удовлетворения требований энергетической промышленности. Лопатки турбины, используемые в газовых турбинах, подвергаются самым высоким тепловым и механическим нагрузкам при $1400^\circ C$ [7] в условиях эксплуатации. Во время работы лопатки газовых турбин должны выдерживать как механические, так и термические нагрузки, а также химическое воздействие окисления, которое значительно увеличивается с температурой. В настоящее время только композитный материал, состоящий из основного материала, обычно суперсплавов на основе Ni, и покрытий на основе MCrAlY (M = Co, Ni или CoNi), обеспечивает необходимые механические свойства и защиту от высокотемпературной коррозии соответственно. Покрытия используются либо в качестве отдельных защитных покрытий, либо в качестве связующего покрытия для термобарьерных покрытий (TBC), которые широко применяются для лопаток и компонентов горячей секции газовых турбин. По мере увеличения рабочих температур газовых турбин требуемый срок их службы не может быть достигнут с использованием диффузионных покрытий [8], тогда как поверхностные покрытия лучше работают в агрессивной среде при повышенной температуре. Сообщалось о нанесении покрытий MCrAlY (M представляет собой Ni и / или Co) и диффузионных покрытий из Pt-алюминиды в качестве типичных связующих покрытий поверх суперсплавов для обеспечения защиты от окисления, а также для уменьшения несоответствия напряжений между верхним покрытием и суперсплавом [8]. В [9] охарактеризовали покрытие NiCrAlY, нанесенное плазменным напылением на стали котельных труб, и проанализировали его

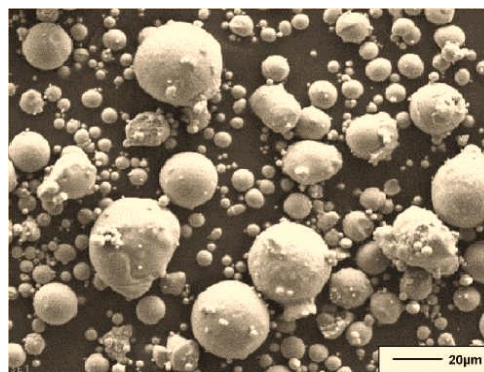


Рис. 2. Микроструктура порошка NiCrAlY-0,4 % CeO_2
Fig. 2. Microstructure of NiCrAlY-0.4% CeO_2 powder

пригодность для применения на тепловых электростанциях. В [10] исследовали адгезионную прочность вакуумно-плазменного напыленного верхнего слоя NiCrAlY, нанесенного на подложку из медного сплава GRCo-84, покрытие связкой Cu-26Cr, и обнаружили, что прочность на растяжение покрытия выше, чем у подложки. Техника распыления с помощью детонационного пистолета (DGS) коммерчески используется при производстве износостойких покрытий из-за их высокой твердости и низкой стоимости энергии. Благодаря низкой пористости и хорошей адгезии покрытий DGS внутренняя диффузия кислорода в покрытиях эффективно предотвращается. Можно достичь температуры 3850°C при горении и максимальной скорости (800-1200 м/с) для распыленных порошков в DGS, которые недостижимы с помощью плазменных и HVOF-процессов. Присутствие 0,4 мас. % CeO₂ в покрытиях NiCrAlY может значительно улучшить как износостойкость, так и коррозионную стойкость покрытий. Церий, будучи поверхностно-активным элементом, снижает поверхностное натяжение и межфазную энергию между ядром кристалла и расплавом в процессе затвердевания, что приводит к улучшению смачивающих свойств и уменьшению краевого угла между расплавом и подложкой. В последние годы редкоземельные элементы (РЗЭ) успешно применялись для изменения поверхностных свойств покрытий, наносимых методом термического напыления. Сообщалось [10], что добавление CeO₂ в покрытия приводит к измельчению зерен и очистке границ зерен, что приводит к увеличению микротвердости и износостойкости покрытий. Кроме того, немного снизился коэффициент трения покрытий с добавлением оксида церия. В [11] исследовали защитную роль покрытия из алюминия с добавлением церия на мягкой стали и сообщили, что церий улучшил защитную эффективность покрытий от сухой песчаной эрозии и коррозии в разбавленной среде NaCl и H₂SO₄. В недавних исследованиях было показано, что эрозионную стойкость алюминидных покрытий можно улучшить за счет редкоземельных элементов, например, иттрий улучшил стойкость покрытий из FeAlCr (Y) к коррозии, коррозионной эрозии и сухой песчаной эрозии соответственно. В [12] были первыми, кто ввел редкоземельные элементы для улучшения износостойкости и коррозионной стойкости покрытий, нанесенных термическим напылением и модифицированных лазером для различных систем, включая покрытия из сплавов, керамические покрытия и покрытия из интерметаллических соединений NiAl. Они также продемонстрировали, что добавление редкоземельных элементов может повысить

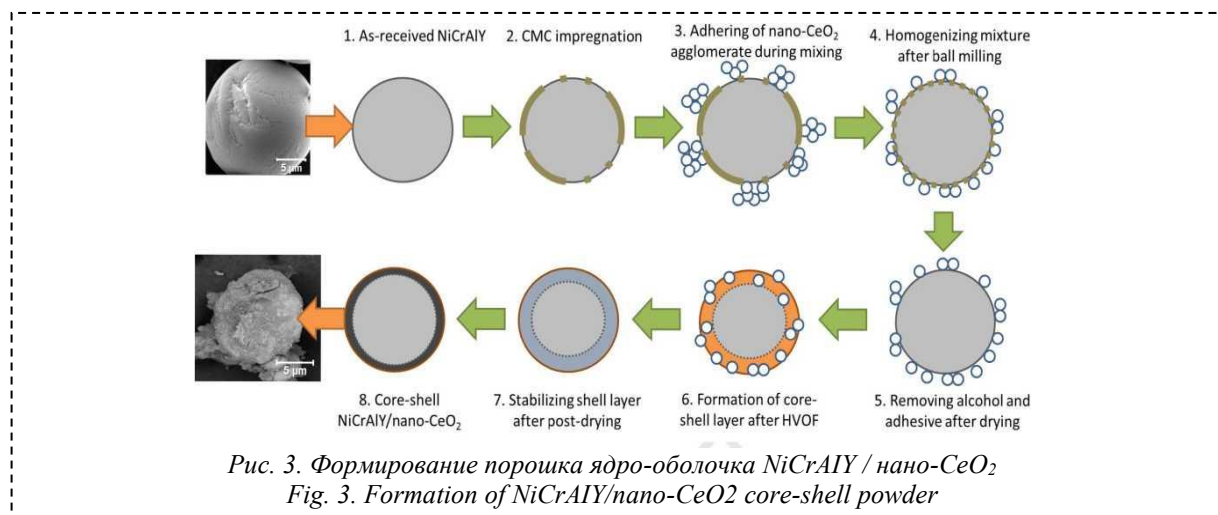
износостойкость и коррозионную стойкость покрытий за счет улучшенной твердости, ударной вязкости, прочности связи и термостойкости материалов покрытия. Первоначально оптимизации общего состава покрытия NiCrAlY уделялось должное внимание, а затем в покрытие был добавлен оксид церия для улучшения микроструктуры и обеспечения повышенной коррозионной стойкости этих покрытий. Несмотря на достигнутый прогресс, требуется подробное исследование для оптимизации окисления, стойкости к горячей коррозии и механических свойств покрытий. Нет опубликованной литературы по применению CeO₂ в покрытиях из сплава NiCrAlY, нанесенных методом DGS. В настоящей работе микроструктура, пористость, толщина покрытия, фазообразование и микротвердость покрытий из сплава NiCrAlY – RE, напыленных с помощью D-распылителя, были изучены с использованием комбинированных методов дифракции рентгеновских лучей (XRD) и автоэмиссионной сканирующей электронной микроскопии/энергии (дисперсионный анализ) (FE-SEM/EDAX), чтобы предоставить экспериментальную основу для обоснования положительного влияния оксидов редкоземельных элементов в промышленности по нанесению покрытий. Для нанесения покрытий был выбран коммерчески доступный порошок NiCrAlY (размер частиц: 5/45 мкм, H.C. Starck – 413,3) с химическим составом Ni-22Cr-10Al-1Y. На Рис. 2 показано, что частицы имеют сферическую форму с широким гранулометрическим составом от 2 до 35 мкм, что почти соответствует диапазону номинальных размеров, предоставленному производителем. Смесь CeO₂ (0,4 мас. %) чистотой 99,99% и порошка NiCrAlY измельчали в обычной вращающейся шаровой мельнице с шарами из нержавеющей стали в качестве измельчающей/мельющей среды в течение 8 часов с получением гомогенного порошка для осаждения покрытия.

В источнике [13] исходные порошки NiCrAlY/нано-CeO₂ со структурой ядро-оболочка были приготовлены с помощью процесса шаровой мельницы и последующего прямого распыления порошка в воду с использованием метода распыления высокоскоростного кислородного топлива (HVOF) (Рис. 3). Для характеристики обработанных порошков использовались рентгеновская дифракция на порошке, растровый электронный микроскоп (SEM) и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS), атомная абсорбционная спектроскопия (AAS) и ультрафиолетовая-видимая спектроскопия (UV-Vis). Результаты показали, что порошки со структурой ядро-оболочка были успешно получены с

использованием этого метода. В этом отношении каждая частица с оболочкой из ядра состояла из относительно однородного нанокompозитного слоя (оболочки), включающего диспергированные наночастицы CeO_2 на поверхности NiCrAlY вместе со сверхмелкозернистой структурой. Кроме того, спектры поглощения порошка с оболочкой из сердцевин отличаются от порошка, измельченного в шаровой мельнице, из-за гомогенизирующего и стабилизирующего эффекта наночастиц CeO_2 в оболочке после прямого распыления HVOF. Результаты анализа показали, что порошок $\text{NiCrAlY}/\text{нано-CeO}_2$ с оболочкой из ядра имеет меньший размер кристаллитов, а также имеет значительную деформацию кристаллической решетки по сравнению с обычным порошком NiCrAlY из-за быстрого плавления и затвердевания во время прямого напыления HVOF в воду. MCrAlY -материалы и покрытия (где $M = \text{Ni}, \text{Co}$ или их смесь) используются в наземных турбинах или авиационных двигателях для защиты их критических деталей от высокотемпературного окисления и коррозии [14]. Значительные улучшения были выполнены в отношении общих характеристик модифицированных порошков и покрытий MCrAlY за счет использования наноструктурированных порошков и добавления реакционноспособных элементов или таких оксидов (например, $\text{Ce}, \text{Re}, \text{Nd}$ и Hf) [15]. Механические и термические свойства модифицированных MCrAlY широко исследуются в настоящее время [16]. Добавление оксида редкоземельного элемента (0,4 мас. % CeO_2) может улучшить стойкость NiCrAlY к окислению при повышенных температурах. Доказано, что адгезионная прочность покрытий NiCrAlY -0,4 мас. % CeO_2 , модифицированных редкоземельными элементами, может быть увеличена за счет образования более тонкой

структуры и меньшего количества включений на границе раздела.

Смешанные порошки, такие как керамические частицы и металлические частицы, недавно были использованы для HVOF или холодного напыления для получения композитных покрытий с прямым нанесением. Кроме того, были проведены некоторые исследования по модификации порошка MCrAlY и покрытий с использованием процесса шаровой мельницы. Структура ядро-оболочка – это относительно новый подход к синтезу порошков с различными характеристиками объема (ядро) и поверхности (оболочка). Порошки ядро-оболочка широко используются для производства высокопроизводительных промышленных деталей, таких как усовершенствованные батареи [16], катализаторы, поглотители газов и сенсоры для широкого спектра химических, нефтехимических, электрических или биологических применений. В последнее время для синтеза различных типов порошковых компонентов типа ядро-оболочка применяется ряд методов, таких как распыление, пиролиз ультразвуковым распылением, плазменное и холодное напыление, а также процесс контролируемого механического измельчения. Недавно были также синтезированы новые структуры ядро-оболочка, такие как WC-Co [17], $\text{CaO-SiO}_2\text{-ZrO}_2$ [18], $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-Co}$ [19], используя упомянутые выше методы получения или синтеза. В [19] синтезировали порошки ядро-оболочка YSZ/TiO_2 с использованием процесса воздушно-плазменного напыления, кроме того, использовали структурированный порошок WC-Co со структурой ядро-оболочка для разработки покрытий с высокой износостойкостью с помощью техники холодного напыления. Исследователи сообщили, что степень пористости покрытий была уменьшена с 1,8 до 0,7%, а также была увеличена вязкость



разрушения с использованием порошка ядро-оболочка. Очень мало исследований о синтезе и получении порошков исходного материала типа ядро-оболочка с использованием методов термического напыления. Кроме того, разработка порошков со структурой с оболочкой из сердечника для использования в области высокотемпературного окисления и коррозии (например, MCrAlY) еще не исследована. Таким образом, настоящее исследование сосредоточено на разработке порошков ядро-оболочка $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ с использованием процесса прямого высокоскоростного распыления кислородного топлива (HVOF) в воде. Это исследование направлено на получение

модифицированного порошка NiCrAlY с присутствием наночастиц CeO_2 со структурой ядро-оболочка. Этот тип порошка может иметь высокий потенциал для использования в качестве исходного порошка для последующего процесса термического напыления с целью разработки нового поколения усовершенствованных покрытий на основе NiCrAlY для высокотемпературных применений [20]. Коммерческий сферический порошок NiCrAlY от Oerlikon-Metco (Amdry 365-4) и коммерческие наночастицы оксида церия (IV) (CeO_2) (Sigma-Aldrich, США) были использованы для приготовления порошков со структурой с сердцевинной оболочкой. На

Таблица 1. Параметры шаровой мельницы для приготовления смеси $\text{NiCrAl}/\text{nano-CeO}_2$

Table 1. Ball mill parameters for the preparation of $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ mixture

Показатели	Значения
Массовое отношение шарика к порошку, вес, %	15
Скорость вращения (об / мин)	110
Время смешивания (ч)	1
атмосфера	аргон

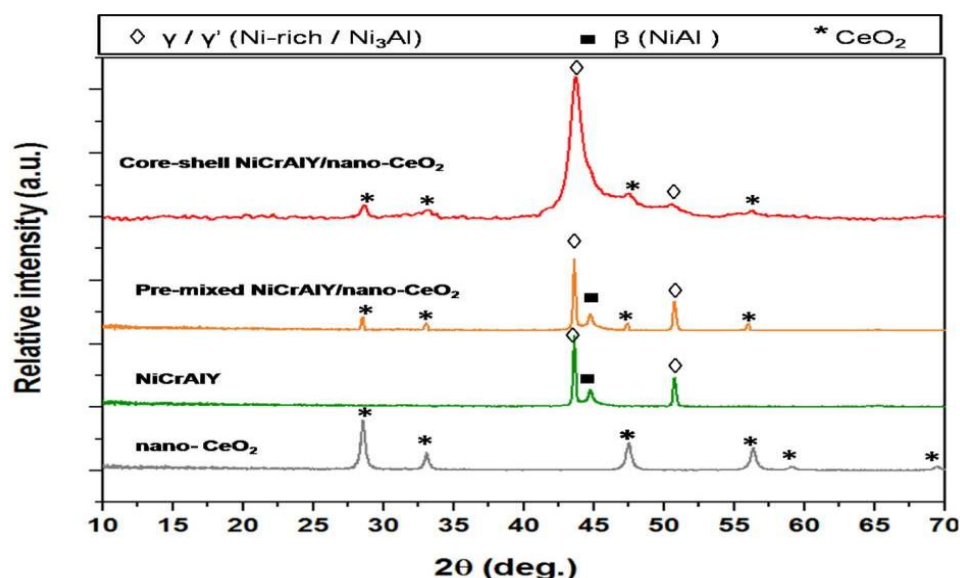


Рис. 4. Рентгенограммы обычного NiCrAlY в сравнении со смешанными порошками $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ и порошками $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ в оболочке

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of conventional NiCrAlY compared to $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ mixed powders and coated $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ powders

Таблица 2. Параметры HVOF для напыления порошка $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ с оболочкой из сердцевинны

Table 2. HVOF parameters for spraying $\text{NiCrAlY}/\text{nano-CeO}_2$ powder with core shell

Показатели	Значения
Тип топлива	Пропан
Расход топлива (л/мин)	55
Расход кислорода (л/мин)	210
Вращение порошкового питателя (об/мин)	430
Скорость подачи порошка (г/мин)	38
Газ-носитель	Азот
Расход газа-носителя (л/мин)	20
Расстояние противостояния (мм)	450

первом этапе для приготовления была выбрана смесь, состоящая из 95,0 мас. % NiCrAlY + 5,0 мас. % Нано-CeO₂. Массовый процент порошковой смеси был рассчитан с помощью цифровых весов с точностью 1×10^{-4} г. На втором этапе обычные порошки NiCrAlY были пропитаны небольшим количеством адгезива на основе карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), и из-за этого поверхность порошков NiCrAlY была электростатически заряжена (отрицательно). После этого порошок нано-CeO₂ был добавлен к порошкам NiCrAlY, пропитанным КМЦ, вместе с 0,4 мас. % раствором изопропилового спирта. Процесс измельчения в шаровой мельнице был выбран для создания нанокompозитного слоя на поверхности каждой частицы порошка на основе ограниченной пластической деформации поверхности каждой частицы порошка, вызванной прямым механическим контактом между шариками и порошковой смесью. Исходя из этой идеи, полученную смесь порошков затем измельчали в шаровой мельнице при 110 об/мин в течение 1 ч. В Таблице 1 перечислены параметры механического помола для приготовления смешанного/измельченного в шаровой мельнице порошка NiCrAlY/нано-CeO₂. Затем была проведена сушильная обработка на воздухе при 150°C в течение 30 минут для

гомогенизации порошков, увеличения текучести и удаления (любых) летучих органических соединений (ЛОС), образующихся из КМЦ, и растворов алкоголя из смешанного/измельченного в шаровой мельнице порошка. Как следствие, наночастицы CeO₂ прикреплялись к поверхности порошка NiCrAlY за счет эффекта электростатического заряда. Для получения и стабилизации конечного порошка со структурой с внутренней оболочкой вышеупомянутый подготовленный порошок затем распыляли в дистиллированной воде с использованием системы распыления HVOF, оснащенной распылительным пистолетом HuerJet 2700 (МЕС, Индия). В связи с этим основные параметры распыления HVOF были представлены в Таблице 2. На заключительной стадии подготовки распыленные порошки ядро-оболочка сушили при 80°C в течение 1 часа. На Рис. 3 представлены пошаговые процессы приготовления порошка NiCrAl/нано-CeO₂ типа ядро-оболочка. Характеристики порошков обычных порошков, смешанных/измельченных в шаровой мельнице и порошков ядро-оболочка, исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM), оснащенной энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (EDS) (Рис. 4 и 5).

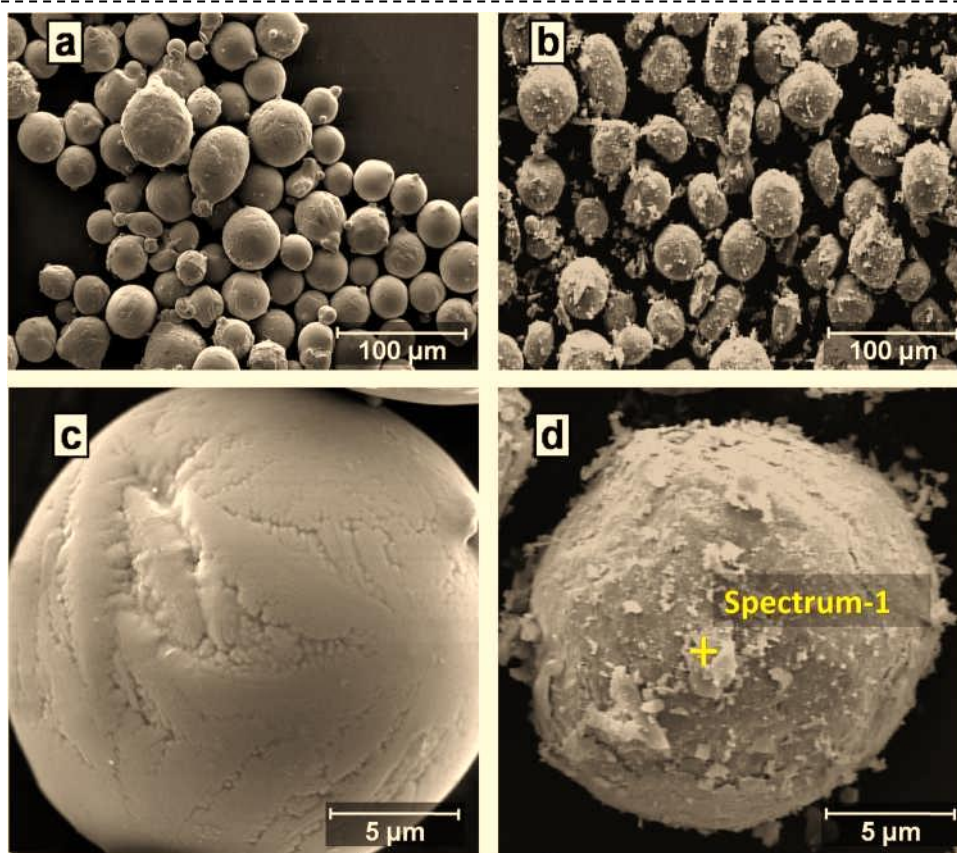


Рис. 5. Сканирующие электронные изображения: a и c) обычного порошка NiCrAlY, b и d) смешанного NiCrAlY/нано-CeO₂ перед напылением HVOF
 Fig. 5. Scanning electron images of a and c) conventional NiCrAlY powder, b and d) mixed NiCrAlY/nano-CeO₂ powder before HVOF deposition.

Выводы

На основе проведенного обзора современного применения и особенностей создания материалов для нанесения многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур и интенсивного износа, можно констатировать, что композиции из металлокерамики на основе сплавов никель (кобальт)-хром-алюминий-иттрий (иттербий, церий) и оксидов (диоксид циркония, оксид алюминия, оксид алюминия-оксид титана, оксид церия, оксид иттербия и их композиции) являются основой для целого спектра таких покрытий. Металлические сплавы на основе материала MCrAlY очень часто применяются как функциональное внешнее покрытие или связующее покрытие при процессе плазменного напыления и весьма полезны при защите поверхностей от разрушения при высокотемпературном воздействии на компоненты эксплуатируемых деталей. Новая область использования данных покрытий может быть получена путем добавления частиц новых материалов к базовой металлической матрице MCrAlY для создания композиционных покрытий. Газотермические композиционные покрытия MCrAlY с усиленными функциональными свойствами из-за добавления армирующих элементов, таких как иттрий-стабилизированный диоксид циркония (YSZ) ($ZrO_2-8Y_2O_3$), CeO_2 , $Al_2O_3-TiO_2$, Al_2O_3 , диоксид циркония (CSZ) ($ZrO_2-25CeO_2-2,5Y_2O_3$), характеризуются повышенными механическими свойствами, коррозионной и термической стойкостью. Однако недостаточная прочностная связь между оксидами и металлической матрицей, формирование трещин, сколы, пористость являются характерными недостатками у газотермически напыленных покрытий. Для уменьшения этих дефектов и улучшения прочностных характеристик покрытия применяются различные варианты последующей высокоэнергетической обработки с помощью лазера или компрессионной плазмы. Добавление оксидной керамики со стабилизацией редкоземельными элементами (РЗЭ) в покрытиях MCrAlY может значительно улучшить как износостойкость, так и коррозионную стойкость покрытий. РЗЭ, будучи поверхностно-активными элементами, снижают поверхностное натяжение и межфазную энергию между ядром кристалла и расплавом в процессе затвердевания, что приводит к улучшению смачивающих свойств и уменьшению краевого угла между расплавом и подложкой. В последние годы редкоземельные элементы успешно применялись для изменения поверхностных свойств покрытий, наносимых методом термического напыления. Добавление РЗЭ в покрытия приводит к измельчению зерен и

очистке границ зерен, что увеличивает микротвердость и износостойкость покрытий, снижает коэффициент трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kashani H., Amadeh A., Ghasemi H. M. Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies // *Wear*. 2007. № 262. Pp. 800–806.
2. Fernandes F., Lopes B., Cavaleiro A., Ramalho A., Loureiro A. Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron // *Surface and Coatings Technology*. 2011. № 205. Pp. 4094–4106.
3. Lee J. H., Lee D. B. Hot corrosion of NiCrAlY/(ZrO₂-CeO₂-Y₂O₃) composite coatings in NaCl-Na₂SO₄ molten salt // *Mater. Sci. Forum*. 2010. № 658. Pp. 228–231.
4. Zhu C., Wang Y. G., An L. N., Javed A., Xiao P., Liang G. Y. Microstructure and oxidation behavior of conventional and pseudo graded NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings produced by supersonic air plasma spraying process // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 272. Pp. 121–128. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.04.014.
5. Bezençon C., Schnell A., Kurz W. Epitaxial deposition of MCrAlY coatings on a Ni-base superalloy by laser cladding // *Scr. Mater*. 2003. № 49. Pp. 705–709.
6. Fernandes F., Cavaleiro A., Loureiro A. Oxidation behavior of Ni-based coatings deposited by PTA on gray cast iron // *Surface and Coatings Technology*. 2012. № 207. Pp. 196–203.
7. Huang Z., Hou Q., Wang P. Microstructure and properties of Cr₃C₂-modified nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc process // *Surface and Coatings Technology*. 2008. № 202. Pp. 2993–2999.
8. Zikin A., Badisch E., Hussainova I., Tomastik C., Danninger H. Characterisation of TiC-NiMo reinforced Ni-based hardfacing // *Surface and Coatings Technology*. 2013. № 236. Pp. 36–44.
9. Wang Y., Liu J. J., Yu Z. H. Effect of rare earth elements, on microstructure and wear resistance of laser remelted iron alloy coatings containing metalloids // *Surf. Eng.* 1993. № 9. Pp. 151–155.
10. Achar D. R. G., Munoz-Arroyo R., Singheiser L., Quadackers W. J. Modelling of phase equilibria in MCrAlY coating systems // *Surface and Coatings Technology*. 2004. № 187(2). Pp. 272–283.
11. Ghadami F., Heydarzadeh Sohi M., Ghadami S. Effect of TIG surface melting on structure and wear properties of air plasma-sprayed WC-Co coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2015. № 261. Pp. 108–113.
12. Tobar M. J., Amado J. M., Yáñez A., Pereira J. C., Amigó V. Laser Cladding of MCrAlY Coatings on Stainless Steel // *Physics Procedia*. 2014. № 56. Pp. 276–283.

13. Heydarzadeh Sohi M., Ghadami F. Comparative tribological study of air plasma sprayed WC-12%Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit // Tribology international. 2010. Vol. 43(5). Pp. 882–886.
14. Li C. [et al.] Influence of water vapour on the HfO₂ distribution within the oxide layer on CoNiCrAlHf alloys // Journal of alloys and compounds. 2018. Vol. 739. Pp. 690–699.
15. Bergholz J. [et al.] Effect of test atmosphere composition on high-temperature oxidation behaviour of CoNiCrAlY coatings produced from conventional and ODS powders AU – Huang // Materials at high temperatures. 2018. Vol. 35(1–3). Pp. 97–107.
16. Ghadami F., Aghdam A. S. R. Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post-treatments: A critical review // Thin Solid Films. 2019.
17. Zhang T., Li D. Y. Effects of yttrium on corrosive erosion and dry sand erosion of FeAlCr (Y) diffusion coatings on 1030 steel // J. Mater. Sci. Eng. 2000. № 277. Pp. 18–24.
18. Wang Y., Yu Z. H., Liu J. J., Wang C. S., Li Q. A. The influence of CeO₂ on the microstructure and wear resistance of M80S20 flame spray and flame spray welding coatings // J. Rare Earths. 1992. № 10. Pp. 212–216.
19. Bergholz J., Pint B. A., Unocic K. A., Vaßen R. Fabrication of Oxide Dispersion Strengthened Bond Coats with Low Al₂O₃ Content // Journal of Thermal Spray Technology. 2017. № 26(5). Pp. 868–879.
20. Okovity V. A., Ilyushchenko A. F., Devoino O. G., Shevtsov A. I., Sobolevsky S. B., Okovity V. V. Creation of gradient plasma coatings based on zirconium dioxide, partially stabilized by cerium oxide // Powder metallurgy. 2013. Iss. 36. Pp. 48–54.

© 2026 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 Федорович Иванович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), профессор кафедры порошковой металлургии, сварки и технологии материалов, чл.-кор. НАН Б, доктор техн. наук, профессор, e-mail: panteleyenkofit@tut.by

Девойно Олег Георгиевич, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), заведующий ОНИЛ ПиЛТ, доктор техн. наук, проф. (+375 17 331-30-58, e-mail: plazteh@bntu.by)

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

Блюменштейн Валерий Юрьевич, профессор кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), докт. техн. наук, профессор, e-mail: blumenstein.vu@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

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

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

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

Блюменштейн В. Ю. – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

REVIEW OF MODERN APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON NICKEL ALLOYS WITH CERAMICS SYSTEMS FOR FORMING MULTILAYER COMPOSITE PLASMA COATINGS. PART 1

Fyodor I. Panteleenko¹, Oleg G. Devoino¹, Vasily V. Okovity¹, Valery Yu. Blumenstein²

¹ Belarusian National Technical University,

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: panteleyenkofi@tut.by



Article info

Received:

30 December 2025

Accepted for publication:

15 May 2026

Accepted:

11 June 2026

Published:

29 June 2026

Keywords: composite material, nickel-chromium-aluminum-yttrium, oxide ceramics, plasma spraying, durability and reliability of mechanisms, heating rate of powder particles, diffusion of molten salts, hot corrosion

Abstract.

The article provides an overview of the modern application of composite materials based on nickel alloys with ceramics systems for the formation of multilayer composite plasma coatings. Metal alloys based on MCrAlY material are very often used as a functional external coating or a bonding coating in the plasma spraying process and are very useful in protecting surfaces from destruction under high-temperature exposure on components of operating parts. A new area of application of these coatings can be obtained by adding particles of new materials to the basic MCrAlY metal matrix to create composite coatings. Thermal spray composite coatings MCrAlY with enhanced functional properties due to the addition of reinforcing elements such as yttrium-stabilized zirconium dioxide (YSZ) ($ZrO_2-8Y_2O_3$), CeO_2 , $Al_2O_3-TiO_2$, Al_2O_3 , zirconium dioxide (CSZ) ($ZrO_2-25CeO_2-2.5Y_2O_3$) are characterized by enhanced mechanical properties, corrosion and thermal resistance. However, insufficient strength bond between oxides and metal matrix, crack formation, chipping, porosity are typical disadvantages of thermal spray coatings. To reduce these defects and improve the strength characteristics of the coating, various options for subsequent high-energy processing using a laser or compression plasma are used. The addition of rare earth element (REE) stabilized oxide ceramics to MCrAlY coatings can significantly improve both wear resistance and corrosion resistance of the coatings. REEs, being surface-active elements, reduce the surface tension and interfacial energy between the crystal core and the melt during solidification, which leads to improved wetting properties and a decrease in the contact angle between the melt and the substrate. In recent years, rare earth elements have been successfully used to modify the surface properties of thermal spray coatings. The addition of REE to the coatings results in grain refinement and grain boundary cleaning, which increases the microhardness and wear resistance of the coatings, and reduces the friction coefficient.

For citation: Panteleenko F.I., Devoino O. G., Okovity V.V., Blumenstein V.Yu. Review of modern application of composite materials based on nickel alloys with ceramics systems for forming multilayer composite plasma coatings. Part 1. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):45-55. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-45-55, EDN: QEOPQQ

REFERENCES

1. Kashani H., Amadeh A., Ghasemi H.M. Room and high temperature wear behaviors of nickel and cobalt base weld overlay coatings on hot forging dies. *Wear*. 2007; 262:800–806.
2. Fernandes F., Lopes B., Cavaleiro A., Ramalho A., Loureiro A. Effect of arc current on microstructure and wear characteristics of a Ni-based coating deposited by PTA on gray cast iron. *Surface and Coatings Technology*. 2011; 205:4094–4106.
3. Lee J.H., Lee D.B. Hot corrosion of NiCrAlY/(ZrO₂-CeO₂-Y₂O₃) composite coatings in NaCl-Na₂SO₄ molten salt. *Mater. Sci. Forum*. 2010; 658:228–231.
4. Zhu C., Wang Y.G., An L.N., Javed A., Xiao P., Liang G.Y. Microstructure and oxidation behavior of conventional and pseudo graded NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings produced by supersonic air plasma spraying process. *Surface and Coatings Technology*. 2015; 272:121–128. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2015.04.014.
5. Bezençon C., Schnell A., Kurz W. Epitaxial deposition of MCrAlY coatings on a Ni-base superalloy by laser cladding. *Scr. Mater*. 2003; 49:705–709.
6. Fernandes F., Cavaleiro A., Loureiro A. Oxidation behavior of Ni-based coatings deposited by PTA on gray cast iron. *Surface and Coatings Technology*. 2012; 207:196–203.
7. Huang Z., Hou Q., Wang P. Microstructure and properties of Cr₃C₂-modified nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc process. *Surface and Coatings Technology*. 2008; 202:2993–2999.
8. Zikin A., Badisch E., Hussainova I., Tomastik C., Danninger H. Characterisation of TiC-NiMo reinforced Ni-based hardfacing. *Surface and Coatings Technology*. 2013; 236:36–44.
9. Wang Y., Liu J.J., Yu Z.H. Effect of rare earth elements, on microstructure and wear resistance of laser

remelted iron alloy coatings containing metalloids. *Surf. Eng.* 1933; 9:151–155.

10. Achar D.R.G., Munoz-Arroyo R., Singheiser L., Quadackers W.J. Modelling of phase equilibria in MCrAlY coating systems. *Surface and Coatings Technology*. 2004; 187(2):272–283.

11. Ghadami F., Heydarzadeh Sohi M., Ghadami S. Effect of TIG surface melting on structure and wear properties of air plasma-sprayed WC–Co coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2015; 261:108–113.

12. Tobar M.J., Amado J.M., Yáñez A., Pereira J.C., Amigó V. Laser Cladding of MCrAlY Coatings on Stainless Steel. *Physics Procedia*. 2014; 56:276–283.

13. Heydarzadeh Sohi M., Ghadami F. Comparative tribological study of air plasma sprayed WC–12%Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit. *Tribology international*. 2010; 43(5):882–886.

14. Li C. [et al.] Influence of water vapour on the HfO₂ distribution within the oxide layer on CoNiCrAlHf alloys. *Journal of alloys and compounds*. 2018; 739:690–699.

15. Bergholz J. [et al.] Effect of test atmosphere composition on high-temperature oxidation

behaviour of CoNiCrAlY coatings produced from conventional and ODS powders AU – Huang. *Materials at high temperatures*. 2018; 35(1–3):97–107.

16. Ghadami F., Aghdam A. S. R. Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post-treatments: A critical review. *Thin Solid Films*. 2019.

17. Zhang T., Li D.Y. Effects of yttrium on corrosive erosion and dry sand erosion of FeAlCr (Y) diffusion coatings on 1030 steel. *J. Mater. Sci. Eng.* 2000; 277:18–24.

18. Wang Y., Yu Z.H., Liu J.J., Wang C.S., Li Q.A. The influence of CeO₂ on the microstructure and wear resistance of M80S20 flame spray and flame spray welding coatings. *J. Rare Earths*. 1992; 10:212–216.

19. Bergholz J., Pint B.A., Unocic K.A., Vaßen R. Fabrication of Oxide Dispersion Strengthened Bond Coats with Low Al₂O₃ Content. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2017; 26(5):868–879.

20. Okovity V.A., Ilyushchenko A.F., Devoino O.G., Shevtsov A.I., Sobolevsky S.B., Okovity V.V. Creation of gradient plasma coatings based on zirconium dioxide, partially stabilized by cerium oxide. *Powder metallurgy*. 2013. № 36. Pp. 48–54.

© 2026 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), Professor of the Department of Powder Metallurgy, Welding, and Material Technology, corr. member NAS of Belarus, Dr. S. in Engineering, prof., e-mail: panteleyenokfi@tut.by

Devoino Oleg Georgievich, 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, research fellow, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus)

Valery Yu. Blumenstein, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Kemerovo, Vesennaya st., 28, Russian Federation), Dr. Sc. in Engineering, e-mail: blumenstein.vu@gmail.com

Contribution of the authors:

Panteleenko F.I. – setting a research problem, scientific management, conceptualization of the study, conclusions.

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

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

Blumenstein V.Yu. – scientific management, review of relevant literature, data collection and analysis..

All authors have read and approved the final manuscript.

