

Научная статья

УДК 621.793.7:621.762

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-56-66

## ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С КЕРАМИКОЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ. ЧАСТЬ 2

Пантелеенко Федор Иванович<sup>1</sup>, Девойно Олег Георгиевич<sup>1</sup>,  
Оковитый Василий Вячеславович<sup>1</sup>, Блюменштейн Валерий Юрьевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

\* e-mail: panteleyenkovfi@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.

Низкокачественное топливо обычно содержит примеси, такие как Na и V, которые могут образовывать коррозионные соли  $Na_2SO_4$  и  $V_2O_5$  на покрытии лопаток турбины. Эти расплавленные коррозионные соли могут проникать на всю толщину YSZ через граничные пятна и другие дефекты покрытия YSZ, такие как микротрещины и открытые поры. Проникшие соли могут затем реагировать с оксидом иттрия (стабилизирующий компонент YSZ), истощение стабилизатора и фазовое превращение тетрагонального диоксида циркония в моноклинный диоксид циркония может происходить очень быстро и эффективно во время охлаждения. Это фазовое превращение также сопровождается быстрым объемным расширением на 3-5%, что приводит к растрескиванию и отслаиванию ТЗП. Добавление  $Al_2O_3$  в покрытие YSZ в ТЗП, напыленных атмосферной плазмой, может значительно снизить диффузию расплавленных солей в слой YSZ и приводит к более высокому сопротивлению ТЗП против горячей коррозии. Можно сказать, что слоистый композит ТЗП, содержащий оксид алюминия, может в значительной мере предотвратить горячую коррозию. Интересно отметить, что  $Al_2O_3$  не может растворяться в  $ZrO_2$ . Оксид алюминия (как жесткая матрица) способен окружать только частицы  $ZrO_2$  в системе ТЗП. Это явление может создавать локальные сжимающие напряжения, которые могут препятствовать фазовому превращению тетрагонального диоксида циркония в моноклинную фазу. Тетрагональная фаза  $ZrO_2$  недостаточно стабильна для длительного применения в условиях окружающей среды, однако добавление частиц оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) к  $ZrO_2$  является одним из эффективных методов ингибирования низкотемпературной деградации. Кроме этого, добавление частиц  $Al_2O_3$  микрометрового размера может привести к дополнительному повышению прочности.

**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 2 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 56-66. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-56-66, EDN: TCBMHC

### Введение

Металлокерамические плазменные покрытия (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 проведенных исследований, для таких условий эффективны упрочненные газотермические покрытия, содержащие твердые тугоплавкие соединения. Указанные покрытия наносятся плазменным напылением с последующей высокоэнергетической обработкой импульсами 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. В рамках данной работы особое внимание будет уделено вопросам влияния формируемой структуры на физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий на основе никелевых сплавов, армированных тугоплавкими оксидами (например,  $ZrO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3-TiO_2$ ).

Поскольку чистые никелевые сплавы 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, изготовление композитных покрытий на основе сплавов никеля, армированных оксидами, представляется необходимым решением для того, чтобы связать стойкость металла к окислению с твердостью и химической стабильностью керамической фазы.

Поскольку покрытия, получаемые из керамики, 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, устойчивыми 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. С учетом значимости адгезионных связей, которые оказывают существенное влияние на работоспособность плазменных покрытий, представляет интерес исследование прочности сцепления композиций, напыленных на оптимизированных режимах. Результаты таких исследований актуальны для окончательных выводов и решений при создании научных основ и технологических принципов нанесения рассматриваемых покрытий.

### Обзор современного применения композиционных материалов

ТЗП выходят из строя во время эксплуатации из-за окисления, горячей коррозии и фазового превращения, что значительно снижает долговечность покрытия [1]. Низкокачественное топливо обычно содержит примеси, такие как Na и V, которые могут образовывать коррозионные соли  $Na_2SO_4$  и  $V_2O_5$  на покрытии лопаток турбины [2]. Эти расплавленные коррозионные соли могут проникать на всю толщину YSZ через граничные пятна и другие дефекты покрытия YSZ, такие как микротрещины и открытые поры [2]. Проникшие соли могут затем реагировать с оксидом иттрия (стабилизирующий компонент YSZ), истощение стабилизатора и фазовое превращение тетрагонального диоксида циркония в моноклинный диоксид циркония может происходить очень быстро и эффективно во время охлаждения [2]. Это фазовое превращение также сопровождается быстрым объемным расширением на 3-5%, что приводит к растрескиванию и отслаиванию ТЗП. В [3] было обнаружено, что наличие плотного слоя  $Al_2O_3$  над покрытием YSZ в ТЗП, напыленном атмосферной плазмой, может значительно снизить диффузию расплавленных солей в слой YSZ и приводит к более высокому сопротивлению ТЗП против горячей коррозии. Можно сказать, что слоистый композит ТЗП,

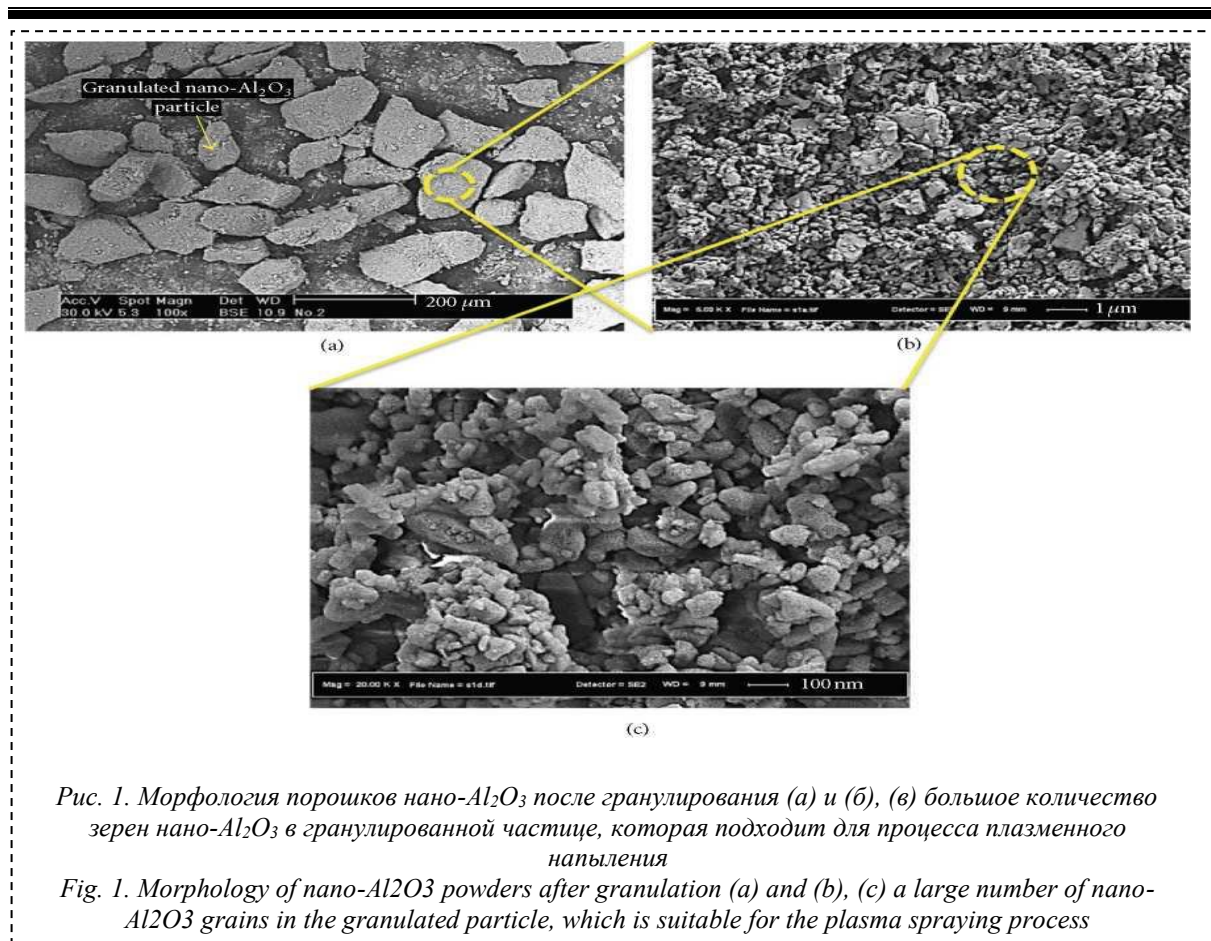


Рис. 1. Морфология порошков  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  после гранулирования (а) и (б), (в) большое количество зерен  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  в гранулированной частице, которая подходит для процесса плазменного напыления

Fig. 1. Morphology of  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  powders after granulation (a) and (b), (c) a large number of  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  grains in the granulated particle, which is suitable for the plasma spraying process

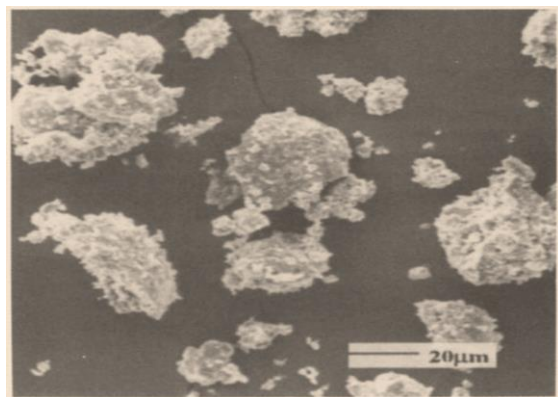
содержащий оксид алюминия, может в значительной мере предотвратить горячую коррозию. Интересно отметить, что  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не может растворяться в  $\text{ZrO}_2$ . Оксид алюминия (как жесткая матрица) способен окружать только частицы  $\text{ZrO}_2$  в системе ТЗП. Это явление может создавать локальные сжимающие напряжения, которые могут препятствовать фазовому превращению тетрагонального диоксида циркония в моноклинную фазу. Следовательно, основная цель этого исследования – улучшить стойкость к горячей коррозии обычных ТЗП с использованием наноксида алюминия в качестве третьего слоя в системе ТЗП. Были исследованы два типа систем ТЗП с воздушно-плазменным напылением: Inconel 738/NiCrAlY/нормальный YSZ и Inconel 738/NiCrAlY/нормальный YSZ/нано- $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Были выбраны три типа промышленных порошков: Amdry 962 (Ni-22Cr-10Al-1Y, -106 + 52 мкм) в качестве связующего покрытия, Metco 204 NS-G ( $\text{ZrO}_2$ - 8%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , -106 + 11 мкм) и Inframmat LLC 0802 (нано- $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  с высокой чистотой, 80 нм) в качестве ТЗП или керамического слоя. Следует отметить, что во время воздушно-плазменного напыления нанопорошки (особенно нанокерамические порошки) могут прилипать к стенкам системы подачи, что делает их перемещение к плазменной горелке чрезвычайно трудным из-за их высокой удельной площади и низкой массы.

Чтобы преодолеть эту проблему, необходимо преобразование наночастиц в гранулы микрометрового размера, это процесс, известный как обработка гранулированием. В связи с этим исследователи обнаружили, что наиболее подходящий размер гранул находится в диапазоне 10-110 мкм. Плотное нанокерамическое покрытие может быть получено с использованием гранулированных нанопорошков, которые обладают отличной текучестью и высокой кажущейся плотностью [3]. Следовательно, в качестве исходных материалов использовались порошки  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  со средним размером частиц менее 80 нм и ПВС (поливиниловый спирт в качестве связующего). В этом методе 50 г ПВС растворяли в 80 мл дистиллированной воды при 200°C с помощью магнитной мешалки. В то же время частицы  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  диспергировали в дистиллированной воде с помощью ультразвуковой машины в течение 30 мин при 60°C. Затем диспергированный раствор  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  добавляли к раствору ПВС с помощью магнитной мешалки при 250°C в течение 45 мин (Рис. 1).

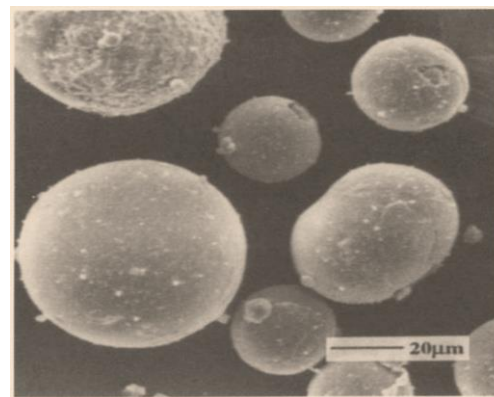
Воду из раствора удаляли с помощью роторного испарителя, чтобы предотвратить сегрегацию фаз. Эти гранулированные порошки сушили в обычной электропечи при 200°C в течение 145 мин (Рис. 1). Затем агломерированные порошки просеивали через

Таблица 1. Химический состав исходных порошков  
Table 1. Chemical composition of the initial powders

Порошковый материал	Состав компонентов		
	Cr	Al	Y
NiCrAlY(мас. %), размер частиц = 40-80 мкм Ni, основа	22,23	9,37	1,18
Стабилизированный иттрием порошок ZrO <sub>2</sub> , основа (мас. %), размер частиц = 35-70 мкм	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	HfO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
	7,02	1,71	0,17



а



б

Рис. 2. СЭМ-микрофотографии порошков до (а) и после (б) сфероидизации  
Fig. 2. SEM micrographs of powders before (a) and after (b) spheroidization

ячейки размером 150 мкм, 100 мкм и 50 мкм, чтобы получить адекватную форму и подходящий размер для плазменного напыления. Конечный размер частиц гранулированных порошков nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, используемых для воздушно-плазменного напыления, оценивается в 80–100 мкм [4]. Традиционные плазменные напыления ТВС первоначально выявили серьезную проблему низкой прочности во время термоциклирования [5], и это было связано с плохой прочностью связи между покрытием и подложкой, низкой устойчивостью к эрозии/коррозии и с отслаиванием покрытий. Эти проблемы могут быть устранены при использовании функционально-градиентных теплозащитных покрытий. Концепция функционально-градиентных материалов (FGM) была впервые предложена для получения материала, способного выдерживать серьезные термомеханические нагрузки, которые часто случаются в конструкциях и термоядерных реакторах в системах космических аппаратов, керамических двигателях, газовых турбинах и дизельных двигателях. Уникальная идея FGM состоит в том, чтобы приготовить новый композит с использованием термостойкой керамики на высокотемпературной стороне для обеспечения адекватной термостойкости и твердых металлов с высокой теплопроводностью на низкотемпературной стороне для обеспечения необходимой механической прочности, с постепенным изменением состава от керамики к металлам. Кроме того, оптимальное градиентное распределение состава, микроstructures и

пористости разработано для эффективного снятия термического напряжения и значительного улучшения механических и термических свойств. Плазменное напыление – гибкий и недорогой метод изготовления покрытий FGM. Были проведены исследования механических и термических свойств термобарьерных покрытий из FGM, полученных плазменным напылением [6]. Однако необходимы обширные исследования во многих аспектах, таких как проектирование, подготовка, оценка и последующая обработка покрытий FGM после напыления. До сих пор в нескольких работах исследовалось улучшение прочности связи покрытий FGM, и, как мы знаем, низкая прочность связи между покрытием и подложкой термобарьерных покрытий, напыленных плазменным напылением, всегда является проблемой, когда эти покрытия подвергаются механическим или термическим воздействиям. В этом исследовании предварительно смешанные порошки, которые были механически измельчены (Рис. 2а) и затем сфероидизированы плазмой в дистиллированную воду (Рис. 2б), были использованы в качестве сырья при плазменном напылении для изготовления покрытий из ZrO<sub>2</sub>-NiCrAlY FGM. Исследовали микроstructure и микротвердость покрытий, измеряли плотность каждого слоя. Была исследована прочность сцепления покрытий после напыления, покрытий, обработанных горячим изостатическим прессованием (HIP-), и покрытий, подвергнутых термообработке. Состав порошков ZrO<sub>2</sub> и NiCrAlY (Alloy

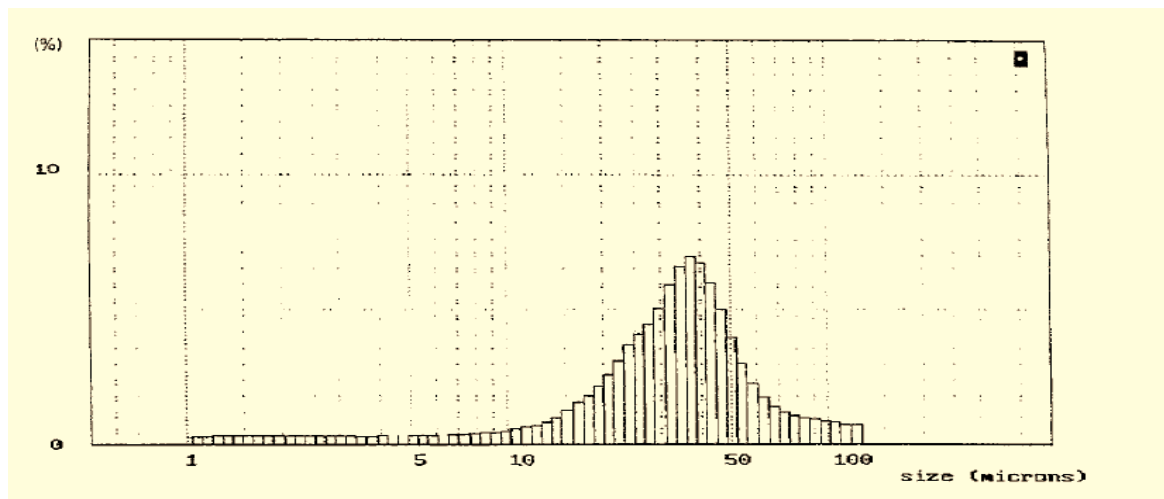


Рис. 3. Распределение частиц по размерам после плазменной сфероидизации  
 Fig. 3. Particle size distribution after plasma spheroidization



Рис. 4. СЭМ-микрофотография полированного предварительно легированного порошка  
 Fig. 4. SEM micrograph of polished pre-alloyed powder

International, Texas, США) приведен в Таблице 1. Смесь этих двух типов порошков с различным соотношением NiCrAlY (0, 25, 50, 75, 100% по весу) измельчали в планетарной мельнице P-5 (Fritsch, GmbH, Германия) с использованием циркониевой чаши и циркониевых шариков. Скорость вращения и время измельчения варьировались от 100-200 об / мин до 0,5-4 ч соответственно. Подходящие параметры измельчения для этих смешанных порошков с размером частиц 20-60 мкм были получены путем анализа этих порошков с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM) и анализатора размера частиц (Fritsch, Analysette 22, Германия). Измельченные в шаровой мельнице порошки были сфероидизированы плазменным напылением в дистиллированную воду с использованием плазменной горелки 40 кВт (SG-100, Miller Thermal Inc., США. Оптимальные параметры шаровой мельницы, при которых средний размер порошков составлял 20-60 мкм, были следующими: 2 часа при 100 об/мин для 75% ZrO<sub>2</sub>-25% NiCrAlY; 3 часа при 100 об/мин для 50% ZrO<sub>2</sub>- 50%

NiCrAlY; и 2 ч при 200 об/мин для порошков 25% ZrO<sub>2</sub>-75% NiCrAlY. На Рис. 2 (а и б) показаны морфологии смешанных порошков, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, до и после плазменной сфероидизации соответственно.

Результат распределения частиц по размерам после плазменной сфероидизации также показан на Рис. 3. Порошки имеют сферическую форму и однородный размер частиц около 20-60 мкм, что является оптимальным для термозащитных покрытий, напыляемых плазмой. Преимущества использования этих сфероидизированных порошков при плазменном напылении можно перечислить следующим образом: более высокая скорость осаждения, более однородные характеристики плавления и лучшая консистенция покрытия [6]. В этом исследовании предварительно смешанные порошки использовались для приготовления покрытий FGM. Образование предварительно смешанных порошков можно объяснить следующим образом: во время обработки в шаровой мельнице некоторые порошки ZrO<sub>2</sub>

измельчаются на мелкие кусочки. По мере продолжения процесса измельчения эти маленькие твердые измельченные порошки  $ZrO_2$  прессуются в пластичный порошок  $NiCrAlY$ , образуя композитный порошок. После сфероидизации образуются многие предварительно смешанные порошки с порошком  $NiCrAlY$  в центре, окруженным слоем  $ZrO_2$ . Когда эти предварительно смешанные порошки используются при плазменном напылении, окисление порошков  $NiCrAlY$ , вероятно, может быть значительно уменьшено из-за инкапсуляции слоя  $ZrO_2$ . На Рис. 4 показан один из примеров предварительно смешанных порошков. Другими преимуществами использования этих предварительно смешанных порошков при плазменном напылении являются обеспечение химической однородности и обеспечение однородной плотности вдоль градиентных слоев.

Прочность и вязкость диоксида циркония ( $ZrO_2$ ) являются лучшими среди различных керамических материалов при комнатной температуре. Тетрагональная фаза  $ZrO_2$  недостаточно стабильна для длительного применения в условиях окружающей среды; однако добавление частиц оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) к  $ZrO_2$  является одним из эффективных методов ингибирования низкотемпературной деградации [7]. Более того, добавление частиц  $Al_2O_3$  микрометрового размера может привести к дополнительному повышению прочности. Керамика на основе  $ZrO_2$  обладает множеством других интересных свойств. Например, кислородные вакансии быстро переносятся через  $ZrO_2$ , и таким образом он может использоваться в качестве электролита для кислородных датчиков. За счет использования высокой электропроводности металлического  $Ni$  композит  $ZrO_2/Ni$  был использован в качестве анодного материала для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) [8]. Модуль упругости и коэффициент теплового расширения (КТР)  $ZrO_2$  близки к таковым для  $Ni$ . Таким образом, система  $ZrO_2-Ni$  может выступать в качестве модельной композитной системы. Тем не менее, помимо применения для ТОТЭ, исследования механических свойств композитов  $ZrO_2/Ni$  отсутствуют [9]. Ограниченные данные о механических свойствах композитов  $ZrO_2/Ni$  указывают на то, что добавление 20-40 об. %  $Ni$  уменьшило бы прочность  $ZrO_2$  [10]. Напротив, недавнее исследование показало, что добавление 1-2 об. % частиц  $Ni$  нанометрового размера может повысить прочность  $ZrO_2$  на 20%. Кроме того,  $ZrO_2$ /наноккомпозит  $Ni$  обладает ферромагнитными характеристиками, которые позволяют использовать его для дистанционного зондирования.  $ZrO_2$  с количеством добавки  $Ni$ , близкой к его порогу перколяции, демонстрирует

высокую относительную диэлектрическую проницаемость, и поэтому такой композит был предложен для исполнительных приложений. Тем не менее, механическая целостность композита важна для любого функционального применения. В исследовании [11] частицы  $Al_2O_3$  микрометрового размера и частицы  $Ni$  нанометрового размера добавляются в матрицу  $ZrO_2$ . Определены механические свойства наноккомпозита  $ZrO_2/(Ni1Al_2O_3)$ . Порошок  $ZrO_2$ , допированный иттрием (TZ-3Y,  $ZrO_2ZrO_2-3$  мол. %  $Y_2O_3$ ,  $d_{50} = 230$  нм, Tosoh Co., Токио, Япония), смешивали с 5 об. %  $Al_2O_3$   $Al_2O_3$  (TM-DAR,  $d_{50} = 210$  нм, Taimei Chem. Co. Ltd., Токио, Япония) порошка путем измельчения в шаровой мельнице в деионизированной воде в течение 24 часов. К суспензии смешанного порошка добавляли капли аммиака для достижения значения pH 9,2. Также был приготовлен отдельный раствор нитрата  $Ni$  ( $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ , Showa Chem. Co., Токио, Япония) с тем же значением pH. Суспензию смешанного порошка выливали в раствор нитрата  $Ni$ ; всю смесь перемешивали в течение 30 мин. Количество  $Ni$  в суспензии составляло 5 об. % порошковых смесей на основе  $ZrO_2$  при условии, что все ионы  $Ni$  адсорбируются на поверхности керамических частиц. Смесью порошков с никелевым покрытием фильтровали, промывали и сушили. Затем смесь восстанавливали в чистом водороде при  $550^\circ C$  в течение 1 часа с последующей обработкой в шаровой мельнице в этиловом спирте в течение 24 часов с мелющими телами  $ZrO_2$  [12,13]. Контрольные образцы  $ZrO_2$ ,  $ZrO_2/Al_2O_3$  и  $ZrO_2/Ni$  также были приготовлены с использованием той же методики для целей сравнения. Количество  $Ni$  в порошковой смеси определяли с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES, 3000DV, Perkin-Elmer, Optima, Бостон, Массачусетс). Необработанные брикеты диаметром 25,4 мм и толщиной 5 мм формовали одноосным прессованием при 30 МПа. Затем прессовки спекали в закрытой графитовой форме при  $1600^\circ C$  в течение 1 часа; они были покрыты порошком графита в форме. Во время спекания образовывалась восстановительная атмосфера, в основном оксид углерода. Скорость нагрева и охлаждения составляла  $5^\circ C/мин$ . Приготовленные материалы в виде брикетов использовались для изучения эксплуатационных свойств. При применении методов измельчения и отбора необходимых фракций данные материалы можно использовать для газотермического напыления. Добавление включений  $Ni$  и  $Al_2O_3$  значительно увеличивает прочность  $ZrO_2$ . Повышение прочности произошло за счет уменьшения размера дефекта, а не увеличения вязкости, что может быть результатом упрочнения границ зерен [14–20].

Добавление нанометровых включений Ni может превратить  $ZrO_2$  из неферромагнетика в ферромагнитный и сегнетоэлектрический материал. Хотя насыщенная намагниченность, коэрцитивная сила и относительная диэлектрическая проницаемость нанокompозита относительно низкие, эти свойства можно улучшить, увеличив содержание Ni или размер частиц Ni. Настоящее исследование демонстрирует универсальность и потенциал материала  $ZrO_2/(Ni + Al_2O_3)$ .

#### Выводы

Низкокачественное топливо обычно содержит примеси, такие как Na и V, которые могут образовывать коррозионные соли  $Na_2SO_4$  и  $V_2O_5$  на покрытии лопаток турбины. Эти расплавленные коррозионные соли могут проникать на всю толщину YSZ через граничные пятна и другие дефекты покрытия YSZ, такие как микротрещины и открытые поры. Проникшие соли могут затем реагировать с оксидом иттрия (стабилизирующий компонент YSZ), истощение стабилизатора и фазовое превращение тетрагонального диоксида циркония в моноклинный диоксид циркония может происходить очень быстро и эффективно во время охлаждения. Это фазовое превращение также сопровождается быстрым объемным расширением на 3-5%, что приводит к растрескиванию и отслаиванию ТЗП. Добавление  $Al_2O_3$  в покрытие YSZ в ТЗП, напыленных атмосферной плазмой, может значительно снизить диффузию расплавленных солей в слой YSZ и приводит к более высокому сопротивлению ТЗП против горячей коррозии. Можно сказать, что слоистый композит ТЗП, содержащий оксид алюминия, может в значительной мере предотвратить горячую коррозию. Интересно отметить, что  $Al_2O_3$  не может растворяться в  $ZrO_2$ . Оксид алюминия (как жесткая матрица) способен окружать только частицы  $ZrO_2$  в системе ТЗП. Это явление может создавать локальные сжимающие напряжения, которые могут препятствовать фазовому превращению тетрагонального диоксида циркония в моноклинную фазу. Тетрагональная фаза  $ZrO_2$  недостаточно стабильна для длительного применения в условиях окружающей среды; однако добавление частиц оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) к  $ZrO_2$  является одним из эффективных методов ингибирования низкотемпературной деградации. Более того, добавление частиц  $Al_2O_3$  минимального размера может привести к дополнительному повышению прочности. Традиционные плазменные напыления ТВС первоначально выявили серьезную проблему низкой прочности во время термоциклирования, и это было связано с плохой прочностью связи между покрытием и подложкой, низкой устойчивостью к

эрозии/коррозии и отслаиванием покрытий. Эти проблемы могут быть устранены при использовании многослойных покрытий. Концепция многослойных покрытий была впервые предложена для получения материала, способного выдерживать серьезные термомеханические нагрузки, которые часто случаются в конструкциях и термоядерных реакторах в системах космических аппаратов, керамических двигателях, газовых турбинах и дизельных двигателях. Уникальность этой идеи состоит в том, чтобы приготовить новый композит с использованием термостойкой керамики на высокотемпературной стороне для обеспечения адекватной термостойкости и твердых металлов с высокой теплопроводностью на низкотемпературной стороне для обеспечения необходимой механической прочности, с постепенным изменением состава от керамики к металлам. Кроме того, оптимальное градиентное распределение состава, микроструктуры и пористости разработано для эффективного снятия термического напряжения и значительного улучшения механических и термических свойств. Для напыления многослойных покрытий применяются различные газотермические методы – распыления высокоскоростного кислородного топлива (HVOF), детонационное напыление, газопламенное, плазменное напыление в вакууме, плазменное напыление на воздухе. Плазменное напыление на воздухе – наиболее гибкий, эффективный и недорогой метод изготовления многослойных покрытий. Были проведены многочисленные исследования механических и термических свойств многослойных покрытий, полученных плазменным напылением. Однако необходимы обширные исследования во многих аспектах, таких как проектирование, подготовка, оценка и последующая обработка покрытий после напыления. До сих пор в нескольких работах исследовалось улучшение прочности связи покрытий, и, как мы знаем, недостаточно высокая для некоторых способов применения прочность связи между покрытием и подложкой многослойных покрытий, напыленных плазменным напылением, всегда является проблемой, когда эти покрытия работают в неблагоприятных условиях. Предлагаемое направление проводимых нами исследований будет касаться технологий создания композиционных порошковых материалов для формирования многослойных плазменных покрытий, работающих в условиях высоких температур при тяжелых и повышенных нагрузках. Для принятия решений, направленных на непосредственное внедрение таких многослойных покрытий, необходимо проанализировать возможности синтеза новых

порошковых композиций из оксидной керамики с добавлением металлических сплавов и разработать принципы и критерии, дающие возможность прогнозировать свойства разрабатываемых покрытий, полученных с применением плазменного напыления и последующей высокоэнергетической обработки, на основе исследований оптимизировать технологические параметры плазменного напыления порошковых композитов и последующей модификации. В рамках работы будут изучены спектры влияния формируемых структур из разработанных порошковых композиций плазменных покрытий на физико-механические и эксплуатационные свойства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaviyarasu K., Fuku X., Mola G.T., Manikandan E., Kennedy J., Maaza M. Photoluminescence of well-aligned ZnO doped CeO<sub>2</sub> nanoplatelets by a solvothermal route // *Materials Letters*. 2016. № 183. Pp. 351–354.
2. Kaviyarasu K., Manikandan E., Nuru Z. Y., Maaza M. Investigation on the structural properties of CeO<sub>2</sub> nanofibers via CTAB surfactant // *Materials Letters*. 2015. № 160. Pp. 61–63.
3. Maria Magdalane C., Kaviyarasu K., Judith Vijaya J., Jayakumar C., Maaza M., Jeyaraj B. Photocatalytic degradation effect of malachite green and catalytic hydrogenation by UV-illuminated CeO<sub>2</sub>/CdO multilayered nanoplatelet arrays: Investigation of antifungal and antimicrobial activities // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2017. № 169. Pp. 110–123.
4. Dadfar M. R., Rahimpour M. R., Vaezi M. R., Gholamzadeh A. Synthesis of YSZ/TiO<sub>2</sub> core-shell feedstock powders via the air plasma spray method // *Micro&Nano Letters*. 2017. № 12. Pp. 435–438.
5. Ma B., Li Y., Su K. Characterization of ceria-yttria stabilized zirconia plasma-sprayed coatings // *Applied Surface Science*. 2009. Vol. 255. № 16. Pp. 7234–7237.
6. Ge Q. L., Lei T. C., Mao J. F., Zhou Y. In situ transmission electron microscopy observations of the tetragonal-to-monoclinic phase transformation of zirconia in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> (2 mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composite // *Journal of Materials Science Letters*. 1993. Vol. 12. № 11. Pp. 819–822.
7. Hussain M. S., Daroonparvar M. R. Application of granulated nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders in thermal barrier coatings at elevated temperatures // *Proceedings of The International Thermal Spray Conference (ASM International)*. 2012. Pp. 200–205.
8. Mendelson M. I., McKechnie T. N. Functionally gradient thermal barrier coatings design, in *Ceramic Transactions*, 34 // *Proc. of The Second Int'l. Symp. on FGM'92*, (eds. Holt J. B., Koizumi M., Hirai T., Munir Z. A.), Am. Cer. Soc., Westerville, OH. 1993. Pp. 417–424.
9. Ягер Д. А., Стовер Д., Шутц Х. Г. Плазменное напыление градиентных композитов // *Труды 4-й Национальной конференции по термическому напылению*, Питтсбург, Пенсильвания, США. Покрытия с помощью термораспыления: свойства, процессы и применение, ASM International, Materials Park, Огайо, 1992. С. 323.
10. Hirano M. Inhibition of Low Temperature Degradation of Tetragonal Zirconia Ceramics: A Review // *Br. Ceram. Trans. J.* 1992. № 91. Pp. 139–147.
11. Lopez-Esteban S., Bartolome J. F., Moya J. S. Mechanical Performance of 3Y-TZP/Ni Composites: Tensile, Bending, and Uniaxial Fatigue Tests // *J. Mater Res.* 2002. № 17. Pp. 1592–1600.
12. Kondo H., Sekino T., Choa Y.-H., Kusunose T., Nakayama T., Wada M., Adachi T., Niihara K. Mechanical and Magnetic Properties of Nickel-Dispersed Tetragonal Zirconia Nano-Composites // *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2002. № 2(5). Pp. 485–490.
13. Cullity B. D. *Element of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publ. Co. Inc., Reading, MA, 1978. P. 101.
14. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Асташинский В. М., Оковитый В. В. Разработка композиционного материала на основе многофункциональной керамики для плазменного напыления // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2015. Вып. 2. С. 43–47.
15. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Талако Т. Л., Пантелеенко А. Ф. Технология получения композиционного материала на основе многофункциональной оксидной керамики // *Обработка металлов*. 2015. № 2(67). С. 3 9–45.
16. Оковитый В. В., Девойно О. Г., Оковитый В. А., Асташинский В. М. Технологические особенности формирования теплозащитных покрытий на основе диоксида циркония // *Наука и техника*. 2016. Вып. 3. С. 193–199.
17. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Девойно О. Г., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храпцов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Соболевский С. Б. Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных оксидных покрытий на элементах экранной противометеорной защиты // *Наука и техника*. 2016. Вып. 5. С. 357–364.
18. Оковитый В. А. [и др.] Многослойные композиционные плазменные оксидных покрытия на элементах экранной защиты на основе диоксида циркония // *Наука и техника*. 2017. Вып. 5. С. 422–431.
19. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Пантелеенко Е. Ф. Исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий диоксид циркония – нихром // *Актуальные проблемы в машиностроении*. 2017. Т. 4. № 3. С. 100–105.
20. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М.,

Храмцов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В.,  
Соболевский С. Б. Формирование и исследование  
плазменных двухслойных композиционных

покрытий (вязкий металлический слой NiCr и  
твердый ZrO<sub>2</sub>) // Наука и техника. 2018. Вып. 1. С.  
21–28.

© 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: panteleyenkofi@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 2

Fyodor I. Panteleenko<sup>1</sup>, Oleg G. Devoino<sup>1</sup>, Vasily V. Okovity<sup>1</sup>,  
Valery Yu. Blumenstein<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Belarusian National Technical University,

<sup>2</sup> 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:

#### Abstract.

Low-quality fuel typically contains impurities such as Na and V, which can form corrosive salts of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> on turbine blade coatings. These molten corrosive salts can penetrate the entire thickness of the YSZ coating through boundary spots and other defects in the YSZ coating, such as microcracks and open pores. The penetrated salts can then react with yttria (the stabilizing component of YSZ), depleting the stabilizer and causing a phase transformation from tetragonal zirconia to monoclinic zirconia, which can occur very quickly and efficiently during cooling. This phase transformation is also accompanied by a rapid volumetric expansion of 3–5%, leading to cracking and peeling of the YSZ coating. The addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to the YSZ coating in atmospheric plasma-sprayed TBCs can

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

significantly reduce the diffusion of molten salts into the YSZ layer and leads to higher hot corrosion resistance of the TBCs. It can be said that the layered TBC composite containing alumina can significantly prevent hot corrosion. Interestingly, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cannot dissolve in ZrO<sub>2</sub>. Alumina (as a rigid matrix) is able to surround only ZrO<sub>2</sub> particles in the TBC system. This phenomenon can create localized compressive stresses, which can hinder the phase transformation of tetragonal zirconia to the monoclinic phase. The tetragonal ZrO<sub>2</sub> phase is not stable enough for long-term use under ambient conditions; however, the addition of alumina particles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) to ZrO<sub>2</sub> is one of the effective methods for inhibiting low-temperature degradation. In addition, the addition of micrometer-sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles can lead to an additional increase in strength.

**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 2. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):56-66. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-56-66, EDN: TCBMHC

## REFERENCES

1. Kaviyarasu K., Fuku X., Mola G.T., Manikandan E., Kennedy J., Maaza M. Photoluminescence of well-aligned ZnO doped CeO<sub>2</sub> nanoplatelets by a solvothermal route. *Materials Letters* 2016; 183:351–354.
2. Kaviyarasu K., Manikandan E., Nuru Z.Y., Maaza M. Investigation on the structural properties of CeO<sub>2</sub> nanofibers via CTAB surfactant. *Materials Letters*. 2015; 160:61–63.
3. Maria Magdalane C., Kaviyarasu K., Judith Vijaya J., Jayakumar C., Maaza M., Jeyaraj B. Photocatalytic degradation effect of malachite green and catalytic hydrogenation by UV-illuminated CeO<sub>2</sub>/CdO multilayered nanoplatelet arrays: Investigation of antifungal and antimicrobial activities. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2017; 169:110–123.
4. Dadfar M.R., Rahimipour M.R., Vaezi M.R., Gholamzadeh A. Synthesis of YSZ/TiO<sub>2</sub> core-shell feedstock powders via the air plasma spray method. *Micro&Nano Letters*. 2017; 12:435–438.
5. Ma B., Li Y., Su K. Characterization of ceria-yttria stabilized zirconia plasma-sprayed coatings. *Applied Surface Science*. 2009; 255(16):7234–7237.
6. Ge Q. L., Lei T. C., Mao J. F., Zhou Y. In situ transmission electron microscopy observations of the tetragonal-to-monoclinic phase transformation of zirconia in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> (2 mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) composite. *Journal of Materials Science Letters*. 1993; 12(11):819–822.
7. Hussain M.S., Daroonparvar M.R. Application of granulated nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders in thermal barrier coatings at elevated temperatures. In *Proceedings of The International Thermal Spray Conference (ASM International)*. 2012; 200–205.
8. Mendelson M. I., McKechnie T. N. Functionally gradient thermal barrier coatings design, in *Ceramic Transactions*, 34. *Proc. of The Second Int'l. Symp. on FGM'92*, (eds. J.B. Holt, M. Koizumi, T. Hirai, and Z.A. Munir), Am. Cer. Soc., Westerville, OH. 1993. Pp. 417–424.
9. Jager D.A., Stover D., Schutz H.G. Plasma Spray Deposition of Gradient Composites. *Proceedings of the 4th National Thermal Spray Conference, Pittsburgh, PA, USA, Thermal Spray Coatings: Properties, Processes, and Applications, ASM International*. Materials Park, Ohio. 1992. P. 323.
10. Hirano M. Inhibition of Low Temperature Degradation of Tetragonal Zirconia Ceramics – A Review. *Br. Ceram. Trans. J.* 1992; 91:139–147.
11. Lopez-Esteban S., Bartolome J. F., Moya J. S. Mechanical Performance of 3Y-TZP/Ni Composites: Tensile, Bending, and Uniaxial Fatigue Tests. *J. Mater. Res.* 2002; 17:1592–1600.
12. Kondo H., Sekino T., Choa Y.-H., Kusunose T., Nakayama T., Wada M., Adachi T., Niihara K. Mechanical and Magnetic Properties of Nickel-Dispersed Tetragonal Zirconia Nano-Composites. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2002; 2(5):485–490.
13. Cullity B. D. *Element of X-ray Diffraction*, 2nd edition, p. 101. Addison-Wesley Publ. Co. Inc., Reading, MA. 1978.
14. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Astashinsky V.M., Okovity V.V. Development of a composite material based on multifunctional ceramics for plasma spraying. *Strengthening technologies and coatings*. 2015; 2:43–47.
15. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Talako T.L., Panteleenko A.F. Technology for producing a composite material based on multifunctional oxide ceramics. *Metal Processing*. 2015; 2(67):39–45.
16. Okovity V.V., Devoino O.G., Okovity V.A., Astashinsky V.M. Technological features of the formation of heat-protective coatings based on zirconium dioxide. *Science and Technology*. 2016; 3:193–199.
17. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Devoino O.G., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Khramtsov P.P., Chernik M.Yu., Uglov V.V., Sobolevsky S.B.

Formation and study of multilayer oxide composite plasma coatings on elements of screen anti-meteoroid protection. *Science and Technology*. 2016; 5:357–364.

18. Okovity V.A. [et al.] Multilayer composite plasma oxide coatings on elements of screen protection based on zirconium dioxide. *Science and Technology*. 2017; 5:422–431.

19. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Panteleenko E.F. Study of plasma two-layer composite coatings zirconium

dioxide – nichrome. *Current problems in mechanical engineering*. 2017; 4(3):100–105.

20. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Khramtsov P.P., Chernik M.Yu., Uglov V.V., Sobolevsky S.B. Formation and study of plasma two-layer composite coatings (viscous metallic layer of NiCr and hard ZrO<sub>2</sub>). *Science and Technology*. 2018; 1:21–28.

© 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: panteleyenkofi@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.*

