

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MECHANICAL AND PHYSICAL-TECHNICAL PROCESSING

Научная статья

УДК 621.793.7:621.762

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-1-4-13

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ М-КРОЛЕЙ И ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

Пантелеенко Федор Иванович¹, Оковитый Вячеслав Александрович¹,
Девойно Олег Георгиевич¹, Литвинко Артем Анатольевич¹,
Оковитый Василий Вячеславович¹, Серета Валерий Юрьевич¹,
Асташинский Валентин Миронович², Коротин Владимир Олегович³

¹Белорусский национальный технический университет

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

³Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

*для корреспонденции: panteleyenkofi@tut.by



Информация о статье

Поступила:

27 декабря 2023 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 февраля 2024 г.

Принята к публикации:

29 февраля 2024 г.

Опубликована:

12 марта 2024 г.

Ключевые слова:

композиционный материал, м-кроль, оксидная керамика, плазменное напыление, долговечность и надежность механизмов, скорость нагрева порошковых частиц, метод агломерирования

Аннотация.

В статье приведены результаты разработки композиционного материала на основе $M\text{CrAlYN}$ и оксидной керамики для плазменного напыления. 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. Скорости нагрева порошковых частиц оксидных материалов во время нахождения в плазменном потоке ограничиваются их невысокой теплопроводностью. Изготовление порошковых материалов при помощи метода агломерирования и используемые при этом связующие материалы помогают изготавливать из мелкодисперсных составляющих шихты размером 1-5 мкм довольно крупные агломераты с большими величинами удельной поверхности и необходимой пористостью. Это вызывает повышенный теплообмен между порошковыми частицами и плазменной струей и увеличение значений скорости у напыляемых частиц. Изготовленные по разработанной технологии порошковые материалы обладают рядом особенностей: во-первых, сложной геометрической формой, во-вторых, довольно развитым сформированным рельефом частиц.

Для цитирования: Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Литвинко А.А., Оковитый В.В., Серета В.Ю., Асташинский В.М., Коротин В.О. Композиционный материал для плазменного напыления на основе М-кролей и оксидной керамики // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 1 (161). С. 4-13. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-1-4-13, EDN: HRNZCX

Введение. В настоящее время в различных отраслях промышленности существует большое количество деталей и узлов, работающих в условиях трения (шаровые и цилиндрические подшипники, скользящие токосъемники, вкладыши, подпятники, направляющие, торцевые и боковые уплотнения, шарнирные устройства и др), в которых широко используют износостойкие материалы. Они функционируют при различных условиях – высоких скоростях, больших нагрузках, при наличии граничного трения или трения со смазкой, при повышенных температурах или в вакууме. Процессы коррозии, неблагоприятного воздействия, изнашивания являются главными причинами поломки металлоконструкций и деталей машин. По этим причинам в промышленности выходит из строя около 80-90% деталей. Все эти обстоятельства не дают возможности получить универсальный материал для работы в узлах трения. Возникает необходимость получения различных материалов для заданных условий работы в условиях трения. 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 изнашивании, 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 [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 Al_2O_3 , ZrO_2 и муллит, которые трудно расплавить с помощью других традиционных процессов термического напыления [13]. 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, эффективное применение износостойких покрытий может быть значительно улучшено при применении последующего модифицирующего воздействия на их структуру [14,15]. При обработке износостойких плазменных покрытий высокоэнергетическими воздействиями их источники имеют ряд преимуществ: во-первых, локальность и высокую концентрацию подводимой энергии, позволяющей воздействовать на необходимый участок сформированного износостойкого покрытия, не нарушая тем самым из-за общего нагрева всего объема его микроструктуры и требуемых свойств; во-вторых, возможность строгого управления всеми параметрами воздействий, позволяющими формировать структуру создаваемого слоя, регулировать его шероховатость и необходимые геометрические размеры, получать необходимые параметры износостойкости, общей пористости, твердости. Однако всегда нужно не забывать о способности высокоэнергетической модификации изменять и перераспределять остаточные напряжения в сформированном покрытии, особенно при небольших толщинах покрытия [9-11].

Разработка композиционного материала на основе $MCrAlYTa$ и оксидной керамики для плазменного напыления

Скорости нагрева порошковых частиц оксидных материалов во время нахождения в плазменном потоке ограничиваются их невысокой теплопроводностью. Изготовление порошковых материалов при помощи метода агломерирования и используемые при этом связующие материалы помогают изготавливать из мелкодисперсных составляющих шихты размером 1-5 мкм довольно крупные агломераты с большими величинами удельной поверхности и необходимой пористостью. Это вызывает повышенный теплообмен между порошковыми частицами и плазменной струей и увеличение значений скорости у напыляемых частиц. Нами была разработана специальная технология создания при помощи способа агломерирования композиций керамических составляющих порошковой системы диоксид титана-оксид алюминия-никель-хром-алюминий-иттрий-тантала [12,13]. Первоначально осуществляется дозировка составляющих компонентов у шихты и связующего. На следующем этапе производится гранулирование полученной

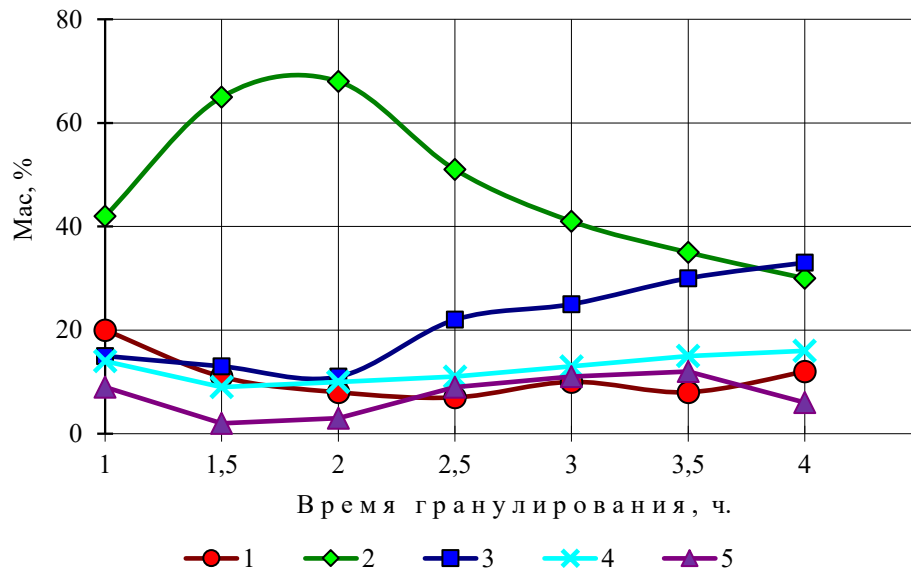


Рис. 1. Изменение процентного содержания различных фракций в полученном продукте 60% $Al_2O_3-TiO_2$ - 40% Ni-Cr-Al-Y-Ta в зависимости от продолжительности процесса гранулирования (1 - 0-40 мкм; 2 - 40-63 мкм; 3 - 63-80 мкм; 4 - 80-100 мкм; 5 - более 100 мкм)

Fig. 1. Change in the percentage of various fractions in the resulting product 60% $Al_2O_3-TiO_2$ - 40% Ni-Cr-Al-Y-Ta depending on the duration of the granulation process (1 - 0-40 microns; 2 - 40-63 microns; 3 - 63-80 microns; 4 - 80-100 microns; 5 - more than 100 microns)

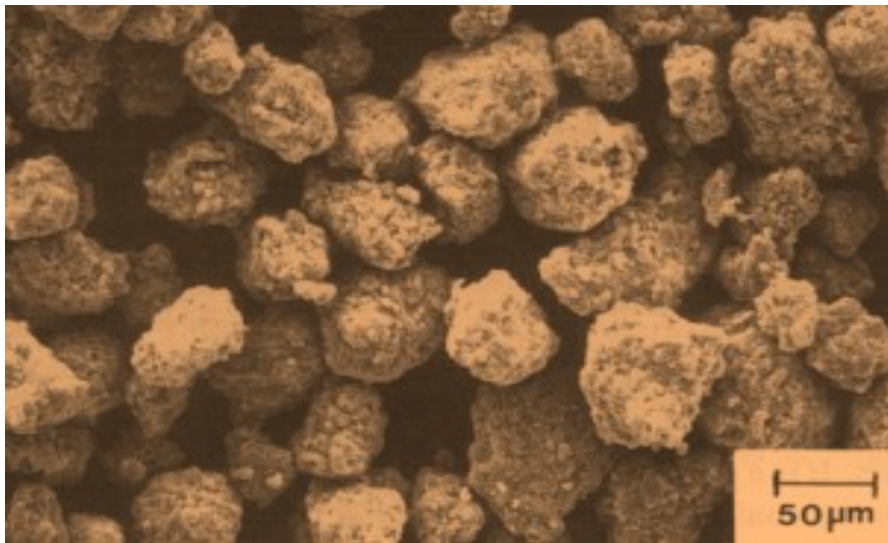


Рис. 2. Полученная морфология порошковых частиц после процесса гранулирования 60% $Al_2O_3-TiO_2$ - 40% Ni-Cr-Al-Y-Ta ($\times 200$)

Fig. 2. Obtained morphology of powder particles after the process Granulation 60% $Al_2O_3-TiO_2$ - 40% Ni-Cr-Al-Y-Ta ($\times 200$)

шихты с вводом связующего. Легкоиспаряемый компонент связующего вещества после проведения операции гранулирования удаляется и происходит процесс спекания – для увеличения значений прочности полученных агломератов. Следующая стадия – изготовленные конгломерированные порошковые материалы насыпают в лодочки из алунада с установкой для

сушки в шкаф СНОЛ 3,5-300. Последующую операцию сушки связующего вещества проводят продолжительностью 1-1,25 часа при температуре процесса 100-150 °С.

При температуре процесса 1000 °С в течение 4 часов осуществляют операцию по спеканию, затем операцию размол и последующего просеивания. Изготовленный порошковый

Таблица 1. Результаты испытаний разработанных порошковых комбинаций для плазменного напыления

Table 1. Test results of the developed powder combinations for plasma spraying

| Состав смеси, масс % | Твердость HRC | Пористость, % | Прочность сцепления, МПа | Износ покр., (Трение со смазкой), мкм |
|---|------------------|------------------|--------------------------------|---|
| Al ₂ O ₃ -TiO ₂ [7] | 50-58 | 14-16 | 48-50 | 5,2-5,6 |
| 70%Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -30%Ni-Cr-Al-Y-T | 50-56 | 12-14 | 49-51 | 4,6-4,8 |
| 60%Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -40%Ni-Cr-Al-Y-Ta | 49-53 | 7-9 | 52-57 | 4,1-4,6 |
| 50%Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -50%Ni-Cr-Al-Y-Ta | 45-49 | 6-10 | 49-53 | 4,6-5,0 |
| 40%Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -60%Ni-Cr-Al-Y-Ta | 43-46 | 5-7 | 47-50 | 5,4-6,3 |
| 30%Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -70%Ni-Cr-Al-Y-Ta | 40-43 | 2,5-4 | 43-45 | 6,7-7,5 |

Таблица 2. Показатели фракционного состава изготовленных порошковых композиций после процесса гранулирования

Table 2. Indicators of the fractional composition of the manufactured powder compositions after the granulation process

| Технологические характеристики гранулирования | Показатели соотношений (%) фракционных составов полученного после процесса гранулирования порошка; мкм | | | | |
|---|--|-------|-------|--------|-----------|
| | 0-40 | 40-63 | 63-80 | 80-100 | Более 100 |
| V _{гр.} =24-36 об/мин в течении 2-2,5 часа при угле наклона 40-50° (Al ₂ O ₃ -TiO ₂) | 8 | 48 | 20 | 10 | 14 |
| V _{гр.} =24-36 об/мин в течении 1,5-2,0 часа при угле наклона 40-50° (Al ₂ O ₃ -TiO ₂ -Ni-Cr-Al-Y-Ta) | 8 | 68 | 11 | 10 | 3 |

материал с фракционным составом 40-63 мкм пригоден для нанесения износостойких плазменных покрытий, узкий состав дает возможность довольно легко перемещать порошковый материал в струе к напыляемой подложке с получением плотных и неокисленных сформированных покрытий. Другие фракционные размеры идут на повторную переработку. Изменение процентного содержания различных фракций в полученном продукте 60% Al₂O₃-TiO₂ – 40 % Ni-Cr-Al-Y-Ta в зависимости от продолжительности процесса гранулирования изображено на Рис. 1. Изготовленные по разработанной технологии порошковые материалы обладают рядом особенностей: во-первых, сложной геометрической формой, во-вторых, довольно развитым сформированным рельефом частиц (Рис. 2). Диапазон размеров у полученных порошковых частиц – 15-300 мкм (при свободной насыпке) и 0-63 мкм (при диспергировании ультразвуком). Эти значительные различия подтверждают склонность материалов порошков к формированию комков из-за их гигроскопичности, рельефа и формы, что снижает их основную технологическую

характеристику – текучесть. Для устранения этого недостатка проведена операция сфероидизации в струе плазменной горелки при распылении в среде аргона [7]. Процентное соотношение порошков в смеси подбиралось на основании проведенных нами экспериментов (Таблица 1).

Анализируя полученные данные испытаний из Таблицы 1, выбираем для последующего использования следующее процентное соотношение в смеси порошков – 60% Al₂O₃-TiO₂ – 40% Ni-Cr-Al-Y-Ta. При соответствующем процентном соотношении эксплуатационные характеристики полученных износостойких покрытий соответствуют или превышают стандартный аналог [7]. На Рис. 4 показана зависимость изменения форм-фактора полученных агломератов [12] от значений мощности плазменной горелки. На Рис. 3 показана морфология порошковых частиц 60% Al₂O₃-TiO₂ – 40% Ni-Cr-Al-Y-Ta после процесса сфероидизации (×500). Получали порошки оксидной керамики следующего состава: 60% Al₂O₃-TiO₂ – 40% Ni-Cr-Al-Y-Ta. Операцию процесса смешивания осуществляли в специальных емкостях в смесительном устройстве (модель 022). Далее навески

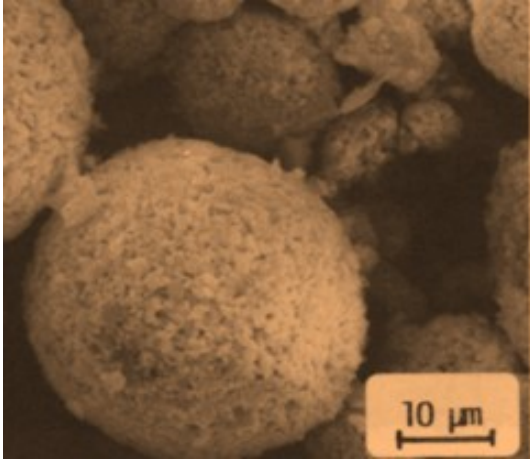


Рис. 3. Морфология порошковых частиц 60% Al_2O_3 - TiO_2 -40% Ni-Cr-Al-Y-Ta после процесса сфероидизации ($\times 500$)

Fig. 3. Morphology of powder particles 60% Al_2O_3 - TiO_2 -40% Ni-Cr-Al-Y-Ta after spheroidization process ($\times 500$)

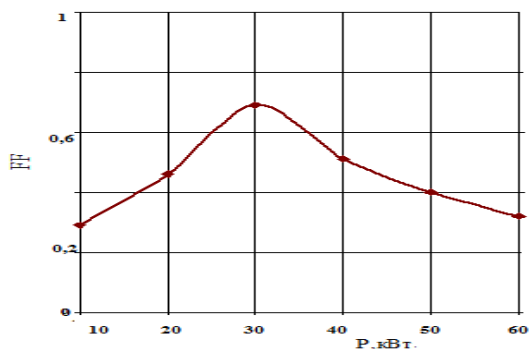


Рис. 4. Влияние мощности плазматрона на изменение показателей форм-фактора сформированных порошковых агломератов

Fig. 4. Influence of the plasma torch power on the change in indicators form factor of formed powder agglomerates

полученной шихты направляли в ротационный гранулятор 03-03-01. Гранулирование полученной порошковой шихты после добавки связующих производили на технологических режимах с максимальным выходом количества мелкодисперсных фракций (скорость вращения у барабана – 60 об/мин при угле наклона барабана – 40° , количество шихты порошка – 130 г).

В процессе исследования влияния гранулирования на кинетику сформированных агломератов выявляли пробы порошковых материалов через определенные временные интервалы (1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 часа) по всем стадиям технологии получения. Количество процентного содержания различных фракций в

сформированном порошковом материале в зависимости от продолжительности процесса гранулирования приведено на Рис. 1.

При времени гранулирования 1,5-2 часа происходит наибольший выход фракции 40-63 мкм, наиболее годной для плазменного напыления. Данные по изменению фракционного состава порошковой смеси 60% Al_2O_3 - TiO_2 -40% Ni-Cr-Al-Y-Ta после процесса гранулирования по технологии [7] и предлагаемой технологии [12] приведены в Таблице 2. На Рис. 3 приведена морфология сформированных порошковых частиц. На следующем этапе порошковые конгломераты в лодочках ПД-КВПТ помещали в сушильный шкаф для последующего удаления связующего при значениях температуры $150^\circ C$ с продолжительностью 1,25 часа. Процесс спекания происходил при температуре около $1100^\circ C$ с продолжительностью 4 часа в камерной печи марки СНОЛ 1,6,2,5,1/II-И2. Процесс размола проводили в шаровой мельнице (МБЛ-1) при скорости вращения барабана 40 об/мин и соотношении весов порошка и шаров – 1:3 (размольные тела – стальные шары диаметром 15 мм). После процесса рассева на воздушном классификаторе фракцию 40-63 мкм вводили в струю плазматрона с последующим распылением в стальной цилиндр (длина 1 м, газовая среда – аргон). При проведении опыта величины мощности плазменной струи варьировались от 10 до 60 кВт (Рис. 4). По значениям форм-фактора частиц (степень несферичности, значение 1 – соответствует сфере) методом оптической металлографии определяли степень сфероидизации полученных порошковых материалов. Максимальная (форм-фактор – 0,9) присуща показателям мощности плазменной струи 30 кВт (Рис. 4). При мощностях плазменной струи ниже и выше 30 кВт значения показателей форм-фактора частиц уменьшаются. На Рис. 3 представлена полученная морфология изготовленных порошковых частиц Al_2O_3 - TiO_2 -Ni-Cr-Al-Y-Ta после процесса сфероидизации. Исследование полученных структур частиц изготовленных композитов производили, применяя металлофизический анализ шлифов с использованием микроскопов «Unimet» (Япония) и MeF-3 (Австрия). Для процесса нанесения износостойких покрытий применяли: установку плазменного напыления на воздухе (УПУ-3Д) с разработанным нами плазматроном БГ-2; порошковые питатели ТВИН и БГ-1; установка для дробеструйной обработки.

Разработанные нами порошки дают возможность формирования из них износостойких плазменных покрытий, эффективно работающих при изнашивании в

Таблица 3. Характеристики разработанных покрытий при трении и износе
Table 3. Characteristics of the developed coatings under friction and wear

| Способ изготовления порошковых материалов | Процесс изнашивания по Стали 45 | | | |
|---|---------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|
| | Трение с применением смазки | | Процесс сухого трения | |
| | Износ покрытия, мкм | Коэффициент трения | Износ покрытия, мкм | Нагрузка задира, кг |
| Разработанный способ | | | | |
| $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$ | 3,6 | 0,05 | 7,3 | 8,9 |
| $Al_2O_3-TiO_2$ [7] | 6,6 | 0,09 | 14,0 | 5,9 |

условиях коррозии. Формирование износостойкого плазменного покрытия осуществляли на режимах: напыление промежуточного слоя (подслоя из порошкового материала ПН85Ю15) толщиной 0,05-0,1 мм: ток электрической дуги $I=300-350$ А; мощность электрической дуги $N=30$ кВт, расход порошка $R_{пор.} = 4$ кг/ч, расход аргона - 30 л/мин; расход водорода 7 л/мин, дистанция напыления - 100 мм. Напыление основного износостойкого слоя из порошковых материалов $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y$ (изготовлен по технологии, разработанной авторами [12]) и $Al_2O_3-TiO_2$ (изготовлен по технологии [7]) толщина - 0,3-0,35 мм: ток электрической дуги $I=450-500$ А; мощность электрической дуги $N=40$ кВт, расход порошка $R_{пор.}=2,5$ кг/ч, расход аргона - 40 л/мин; расход водорода 8 л/мин, дистанция напыления - 110 мм. Проводились испытания на трение и износ на специальном стенде (схема: колодочки с покрытием «азотирующая сталь» (Сталь 45)). Имитируя примерные условия работы при изнашивании деталей двигателей внутреннего сгорания в условиях трения со смазкой и при отсутствии смазочного материала, производились триботехнические испытания при нагрузках в парах трения (5 МПа в течение 10 часов). Эти условия испытания соответствовали примерному составу продуктов сгорания двигателей автотракторной техники (газ 1% SO_2 - 76% O_2-N_2 ; соль Na_2SO_4 - 3,6 % $PbSO_4$ - 5 $mg\cdot cm^{-2}$, $T=650^\circ C$). Полученные данные характеристик параметров трения и износа сформированных покрытий из разработанных порошковых материалов сведены в Таблице 3. Сформированные покрытия из порошковых материалов $Al_2O_3-TiO_2-Ni-Cr-Al-Y-Ta$, полученных по разработанному нами способу, имеют износостойкость больше в 1,9 раза при сухом трении по стали и в 1,8 раза при трении со смазкой, чем покрытие, сформированное из порошка $Al_2O_3-TiO_2$, изготовленного по технологии источника [7]. Наша технология позволяет увеличить показатели износостойкости сформированных износостойких покрытий при условиях высокотемпературной коррозии.

Выводы

В рамках данной работы особое внимание уделено вопросам влияния формируемой структуры на физико-механические и эксплуатационные свойства покрытий на основе сплавов $MgCrAlYTa$ и оксидов (Al_2O_3 , $Al_2O_3-TiO_2$), поскольку чистые $MgCrAlYTa$ 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 $MgCrAlYTa$, армированных тугоплавкими оксидами, представляется необходимым решением для того, чтобы связать стойкость металла к окислению с твердостью и химической стабильностью керамической фазы.

Разработан композиционный материал на основе сплавов $MgCrAlYTa$ и оксидов для плазменного напыления. Сформированные плазмой покрытия, полученные из разработанного порошка $Ni-Cr-Al-Y-Ta-Al_2O_3-TiO_2$ имеют в 1,8 раза больше износостойкость в условиях трения со смазкой и в 1,9 раза - при сухом трении по стали, чем покрытие, полученное из стандартного порошка, $Al_2O_3-TiO_2$. Разработанный материал повышает износостойкость покрытий при работе в условиях высокотемпературной коррозии.

Список литературы

- Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Храмов П. П., Черник М. Ю., Углов В. В., Соболевский С. Б. Формирование и исследование плазменных двухслойных композиционных покрытий (вязкий металлический слой $NiCr$ и твердый ZrO_2) // Наука и техника. БНТУ - Минск. 2018. Вып. 1. С. 21-28.
- Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Асташинский В. М., Оковитый В. В. Технологические особенности формирования плазменных порошковых покрытий из керамики с неравновесной структурой // Наука и техника. БНТУ - Минск. 2018. Вып. 3. С. 183-189.
- Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. В. // Формирование и исследование плазменных порошковых покрытий из оксидной керамики,

модифицированной высокоэнергетическими воздействиями // Наука и техника. БНТУ – Минск. 2018. Вып. 5. С. 377–389.

4. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. В. Формирование покрытий на основе диоксида циркония на элементах экранов противометеорной защиты // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. №6 (130). С.94–101.

5. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Astashinsky V. M., Sobolevsky, S. B., Okovity, V. V. Analysis and selection of possible options for spraying composite multilayer coatings from ceramic powders on protective screens // Fundamental and applied problems of engineering and technology. № 4–2 (336). 2019. P.166–171.

6. Оковитый В.А., Пантелеенко Ф.И., Асташинский В.М., Соболевский С.Б., Оковитый В.В. Формирование плазменных порошковых покрытий из металлокерамики с последующим высокоэнергетическим модифицированием // Наука и техника. БНТУ – Минск. 2020. Вып. 6. С. 469–474.

7. Пантелеенко Ф.И., Асташинский В.М., Оковитый В.А., Сидоров В.А., Рафаил К. Разработка композиционного материала на основе керамики с применением добавок соединений тугоплавких металлов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. Кемерово. 2020. №4 (140). С.18–24.

8. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Сидоров В. А., Оковитый В. В., Девойно О. Г., Володько А. С., Асташинский В. М., Углов В. М. Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных покрытий на основе М-кролей и оксидной керамики с последующими высокоэнергетическими воздействиями // Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». ДонНТУ – Донецк. 2021. №2. С.68–83.

9. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Сидоров В. А., Оковитый В. В., Володько А. В., Асташинский В. М. Современное применение металлокерамических покрытий на

основе систем металл-хром-алюминий-иттрий (М-кролей) // Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». ДонНТУ – Донецк. 2021. №3. С.72–81.

10. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Углов В. И. Формирование и исследование многослойных композиционных плазменных покрытий // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О.Сухого. 2021. №2. С. 15–27.

11. 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. С. 5–17.

12. Оковитый В. А., Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. В., Асташинский В. М. Оптимизация процесса нанесения покрытий из порошков металлокерамики методами плазменного напыления на воздухе // «Наука и техника». БНТУ – Минск. 2021. Вып. 5. С. 369–374.

13. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Astashinsky V. M., Switala F. Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll. Science and Technique. 2022. 21(2):93–98.

14. Пантелеенко, Ф. И., Оковитый В. А., Сидоров В. А., Оковитый В. В., Асташинский В. М., Свитала Ф., Блюменштейн В. М. Выбор оптимальных параметров нанесения многослойных плазменных покрытий из материаллов на основе никелевых М-кролей // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2022. №1. С. 12–22.

15. Пантелеенко Ф. И., Оковитый В. А., Девойно О. Г., Сидоров В. А., Асташинский В. М. Варианты напыления многослойных покрытий из порошков керамики и М-кролей // Международный сборник научных трудов Донецкого национального технического университета «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». ДонНТУ – Донецк. 2022. №1 (76). С.66–72.

© 2024 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 Алексей Федорович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), чл.-корр. НАН Б, доктор техн. наук, профессор, panteleyenkofit@tut.by

Оковитый Вячеслав Александрович, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65), кандидат техн. наук, niil_svarka@bntu.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 plazteh@bntu.by)

Литвинко Артем Анатольевич, заведующий лабораторией НИИЛ СРТиНК, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

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

Серета Валерий Юрьевич, научный сотрудник, Белорусский национальный технический университет (220013, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

Асташинский Валентин Миронович, Белорусский национальный технический университет (220072, Минск, п. Бровки, 15, Беларусь), чл.-кор. НАН Б, доктор физ.-мат. наук, профессор, ast@hmti.ac.by

Коротин Владимир Олегович, аспирант кафедры технологии машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, Российская Федерация), korotinv@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

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

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

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

Литвинко А.А. – обзор соответствующей литературы; написание текста, сбор и анализ данных.

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

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

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

Коротин В.О. – научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; сбор и анализ данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

COMPOSITE MATERIAL FOR PLASMA SPRAYING BASED ON M-CROLLS AND OXIDE CERAMICS

Fyodor I. Panteleenko¹, Vjacheslav A. Okovity¹, Oleg G. Devoino¹, Artem A. Litvinko¹,
Vasily V. Okovity¹, Valery Yu. Sereda¹, Valentin M. Astashinsky²,
Vladimir O. Korotin³

¹Belarusian National Technical University

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

³T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*for correspondence: panteleyenkofi@tut.by



Article info

Received:

27 December 2023

Accepted for publication:

15 February 2024

Accepted:

29 February 2024

Abstract.

The article presents the results of the development of a composite material based on MCrAlYTa and oxide ceramics for plasma spraying. The most promising for obtaining wear-resistant plasma coatings that increase the durability and reliability of mechanisms and machines are those materials that can withstand maximum loads without plastic deformation in friction pairs in a wide range of operating temperatures and have the highest resistance to abrasive wear, the ability to work in aggressive media and vacuum. The most promising for operation under such conditions are compositions that consist of a metal-ceramic matrix and an oxide component evenly distributed in it. The performance of such compositions is ensured by the high strength properties of the cermet matrix. The heating rates of

Published:
12 March 2024

Keywords: composite material, m-croll, oxide ceramics, plasma spraying, durability and reliability of mechanisms, heating rate of powder particles, agglomeration method

powder particles of oxide materials while in the plasma flow are limited by their low thermal conductivity. The manufacture of powder materials using the agglomeration method and the binders used in this process help to produce rather large agglomerates from finely dispersed components of the charge with a size of 1–5 μm with large specific surface area and the required porosity. This causes an increased heat exchange between the powder particles and the plasma jet and an increase in the velocity values of the sprayed particles. Powder materials manufactured using the developed technology have a number of features: firstly, a complex geometric shape; secondly, a rather developed formed relief of particles.

For citation: Panteleenko F.I., Okovity V.A., Litvinko A.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Korotin V.O. Composite material for plasma spraying based on M-crolls and oxide ceramics. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 1(161):4-13. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-1-4-13, EDN: HRNZCX

REFERENCES

1. 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 NiCr metal layer and solid ZrO₂). *Science and technology*. BNTU – Minsk. 2018; 1:21–28.
2. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Astashinsky V.M., Okovity V.V. Technological features of the formation of plasma powder coatings from ceramics with a non-equilibrium structure. *Science and Technology*. BNTU – Minsk. 2018; 3:183–189.
3. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Uglov V.V. Formation and study of plasma powder coatings from oxide ceramics modified by high-energy effects. *Science and Technology*. BNTU – Minsk. 2018; 5:377–389.
4. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Uglov V.V. Formation of coatings based on zirconium dioxide on the elements of screens of anti-meteor protection. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2018; 6(130):94–101.
5. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Astashinsky V.M., Sobolevsky S.B., Okovity V.V. Analysis and selection of possible options for spraying composite multi-layer coatings from ceramic powders on protective screens. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*. 2019; 4-2(336):166–171.
6. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Astashinsky V.M., Sobolevsky S.B., Okovity V.V. Formation of plasma powder coatings from cermets with subsequent high-energy modification. *Science and Technology*. BNTU – Minsk. 2020; 6:469–474.
7. Panteleenko F.I., Astashinsky V.M., Okovity V.A., Sidorov V.A., Rafail K. Development of a composite material based on ceramics with the use of additives of compounds of refractory metals. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2020; 4(140):18–24.
8. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Okovity V.V., Devoino O.G., Volodko A.S., Astashinsky V.M., Uglov V.M. Formation and study of multilayer composite plasma coatings based on M-crolls and oxide ceramics with subsequent high-energy effects. *International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering"*. DonNTU – Donetsk. 2021; 2:68–83.
9. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Sidorov V.A., Okovity V.V., Volodko A.V., Astashinsky V.M. Modern application of ceramic-metal coatings based on metal-chromium-aluminum-yttrium (M-rabbit) systems. *International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering"*. DonNTU – Donetsk. 2021; 3:72–81.
10. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Okovity V.V., Astashinsky V.M., V.V. Uglov, V.I. Formation and study of multilayer composite plasma coatings. *Bulletin of the Gomel State Technical University*. 2021; 2:15–27.
11. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M. Overview of the modern application of ceramic-metal coatings. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2021; 3:5–17.
12. Okovity V.A., Panteleenko F.I., Okovity V.V., Astashinsky V.M. Optimization of the process of applying coatings from cermet powders by plasma spraying in air. *Science and technology*. BNTU – Minsk. 2021; 5:369–374.
13. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Astashinsky V.M., Switala F. Multi-Layers Composite Plasma Coatings Based on Oxide Ceramics and M-Croll. *Science and Technology*. 2022; 21(2):93–98.
14. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Sidorov V.A., Okovity V.V., Astashinsky V.M., Svitala F., Blumenshtein V.M. Selection of optimal parameters for deposition of multilayer plasma coatings from materials based on nickel M-rabbits. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2022; 1:12–22.
15. Panteleenko F.I., Okovity V.A., Devoino O.G., Sidorov V.A., Astashinsky V.M. Options for deposition of multilayer coatings from ceramic powders and M-rabbits. *International collection of scientific papers of the Donetsk National Technical University "Progressive technologies and systems of mechanical engineering"*. DonNTU – Donetsk. 2022; 1:66–72.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

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

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

Artem A. Litvinko, Head of NNIL SRTiNK, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus)

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

Valery Yu. Sereda¹, Senior engineer, Belarusian National Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus)

Valentin M. Astashinsky, 2Institute of Heat and Mass Transfer named after A. V. Lykov NAS of Belarus (220072, Minsk, Brovka, 15), member-cor.NAS of Belarus, Dr. Sc. in Physics and Mathematics, ast@hmti.ac.by

Vladimir O. Korotin, Graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (65 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), korotinv@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

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

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

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

Litvinko A.A. – review of relevant literature; writing text, collecting and analyzing data.

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

Sereda V. Yu. – review of relevant literature; writing text, collecting and analyzing data.

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

Korotin V.O. – scientific management; review of relevant literature; data collection and analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.

