DOI: 10.18411/vntr2022-166-4

УДК 621.762.2

ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПЛАКИРОВАННЫХ НИКЕЛЕМ

© Ирина Николаевна Царева, Людмила Александровна Кривина, Ольга Борисовна Бердник, Евгений Николаевич Разов

Институт проблем машиностроения РАН (ИПМ РАН) – филиал Федерального исследовательского центра "Институт прикладной физики Российской академии наук" (ФИЦ ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия

npktribonika@yandex.ru

Аннотация. *Задача разработки новых порошковых материалов для применения в газотермических технологиях решается путем плакирования металлооксидных частиц тугоплавкой металлической компонентой. Приведены результаты исследований порошков отечественного производства на основе оксида алюминия (корунда) и диоксида циркония, подвергнутых химическому плакированию никелем (8 и 30 %). Методами электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа изучены морфология, гранулярный и фазовый составы, а также распределение элементного состава. Показано, что формирование плотной и однородной металлической оболочки вокруг частиц матричного материала происходит при плакировании 30 % металла. По данным рентгеноструктурного анализа порошковые материалы имеют многофазный состав: (Ni + α-Al_2O_3 + γ-Al_2O_3 + γ*-Al_2O_3) – для порошка оксида алюминия, плакированного 8 % Ni; (Ni + α–Al_2O_3 + γ–Al_2O_3) – для порошка оксида алюминия, плакированного 30 % Ni, (Ni + T-ZrO_2) – для порошка диоксида циркония, плакированного 30 % никеля. Новые порошковые материалы отечественного производства являются конкурентноспособными по отношению к зарубежным аналогам и за счет плакирования металлической компонентой будут способствовать улучшению пластичности формируемых из них плазменных покрытий.*

Ключевые слова: *порошковые материалы, диоксид циркония, оксид алюминия, плакирование никелем, сферическая морфология частиц.*

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021-2023 гг. по теме № 0030-2021-0025.

THE ANALYSIS OF NICKEL-CLAD CERAMIC POWDER MATERIALS

© Irina Tsareva, Lyudmila Krivina, Olga Berdnik, Evgeny Rasov

Leading research of Laboratory of plasma technologies and polyfunctional coatings, Mechanical Engineering Research Institute – Branch of Federal Research Center Institute of Applied Physics Academy of Sciences (MERI RAS), Nizhny Novgorod, Russia

npktribonika@yandex.ru

Abstract. *The task of developing new powder materials for use in gas-thermal technologies is solved by cladding metal oxide particles with a refractory metal component. The results of studies of powders of domestic production based on aluminum oxide (corundum) and zirconium dioxide subjected to chemical nickel plating (8 and 30%) are presented. The morphology, granular and phase compositions, as well as the distribution of the elemental composition were studied using electron microscopy and X-ray diffraction analysis. It is shown that the formation of a dense and homogeneous metal shell around the particles of the matrix material occurs when 30% of the metal is clad. According to X-ray diffraction analysis, powder materials have a multiphase composition: (Ni + α-Al_2O_3 + γ-Al_2O_3 + γ*-Al_2O_3) – for aluminum oxide powder clad with 8% Ni; (Ni + α–Al_2O_3 + γ–Al_2O_3) - for aluminum oxide powder clad with 30% Ni, (Ni + T-ZrO2) - for dioxide powder zirconium clad with 30% nickel. New powder materials of domestic production are competitive in relation to foreign analogues and due to cladding with a metal component will contribute to improving the plasticity of plasma coatings formed from them.*
Keywords: *powder materials, zirconium dioxide, aluminum oxide, nickel plating, spherical morphology of particles.*

Acknowledgements. *The research was done within the MERI RAS state task to carry out the fundamental scientific research during 2021-2023 on subject No. 0030-2021-0025.*

1. Введение. Анализ программ промышленного развития экономически развитых стран показывает, что в настоящее время при производстве 80 % деталей машиностроения используют покрытия различного назначения, что позволяет повысить качество, надежность и долговечность оборудования. Состояние поверхностных слоев определяет износостойкость, коррозионную стойкость, теплопроводность и др. физико-механические свойства материала и работоспособность деталей в целом [1-3].

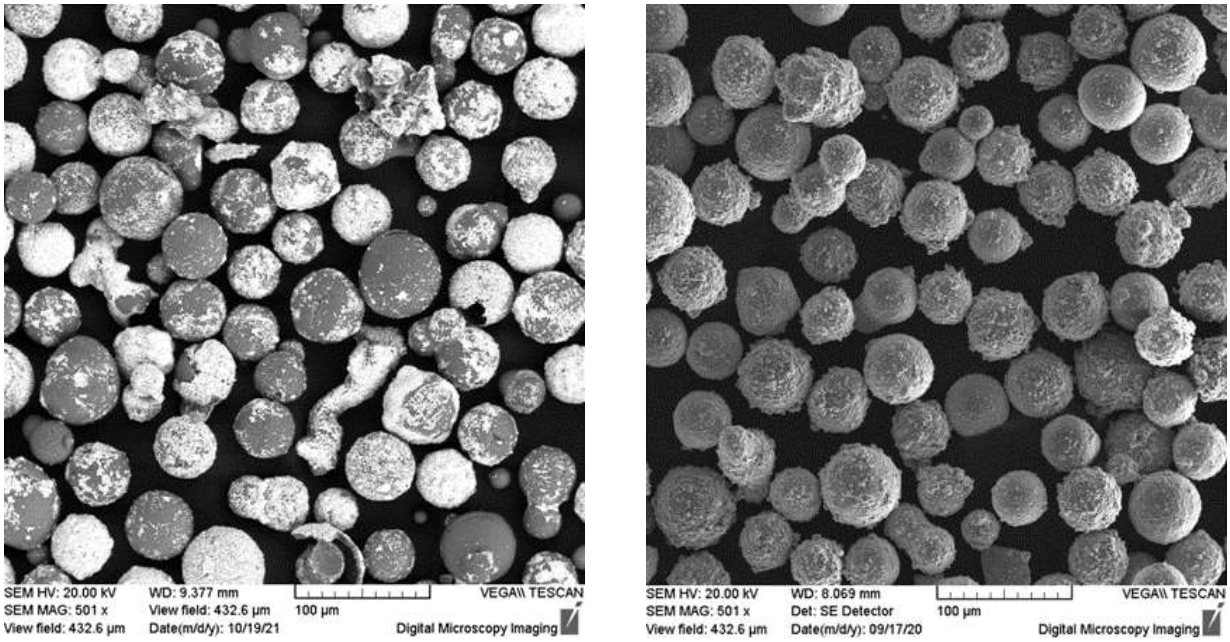
В настоящее время развитие газотермических методов нанесения покрытий идет по пути разработки новых композиционных порошковых материалов [4,5]. Задачей программы стратегического развития российских технологий является разработка и производство конкурентоспособных порошковых материалов [6,7], так как до недавнего времени значительная часть потребности России в них удовлетворялась через импорт. Мировыми лидерами по производству порошков для газотермического напыления являются такие корпорации, как H.C. Starck AMPERIT, Oerlikon Metco, Sulzer Metco. В современных экономических условиях, когда поставки в Россию их продукции были прекращены, в рамках программы импортозамещения перед отечественными производителями была поставлена задача по разработке качественных порошковых материалов.

Наиболее востребованными являются металлооксидные порошковые материалы для получения многофункциональных покрытий. Однако, покрытия, получаемые из оксидных порошков, имеют повышенную хрупкость по сравнению с металлическими порошковыми смесями. Поэтому с целью улучшения пластических свойств покрытий металлооксидной керамики отечественные разработчики идут по пути плакирования порошковых материалов металлической компонентой [8-10]. Плакирование – это осаждение на поверхности частицы слоя другого материала с использованием физических и химических процессов. Наиболее универсальным и эффективным способом нанесения тонкого защитного слоя на частицы порошка является жидкофазное плакирование, обеспечивающее такие преимущества, как широкий перечень напыляемых материалов и видов основы, отсутствие механического

воздействия на основу, возможность механизации технологического процесса и высокая производительность.
В данной статье приведены результаты исследований новых порошковых материалов отечественного производства на основе оксидов алюминия (корунда) и циркония, подвергнутых химическому плакированию тугоплавкой металлической компонентой (никелем).

2. Методика исследований. Исследования проведены на опытных партиях новых порошковых материалов отечественного производства на основе оксида алюминия (Al_2O_3) и диоксида циркония (ZrO_2) со сферической морфологией частиц и разным содержанием (8 и 30 %) плакирующего металла (Ni).
Фазовый состав порошков исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре «Дрон-3М» (съемка по Брэггу-Брентано, Cu-К$_\alpha$-излучение).
Анализ гранулярного состава, морфологии, микроструктуры и распределения элементного состава проводили на сканирующем электронном микроскопе TESKAN VEGA II, количественный элементный анализ – на энергодисперсионном спектрометре INCA Energy-250.

3. Результаты исследований. Порошковый материал на основе оксида алюминия (Al_2O_3) предназначен для плазменного напыления износостойкого покрытия. В качестве матричного материала был выбран порошок на основе корунда с гранулярным составом 20/50 мкм и размером основной фракции ~ 40 мкм (рис.1). Цельные частицы исследуемых порошков имеют преимущественно сферическую форму, но встречаются и частицы неправильной формы, а также сколотые частицы (рис.1а).

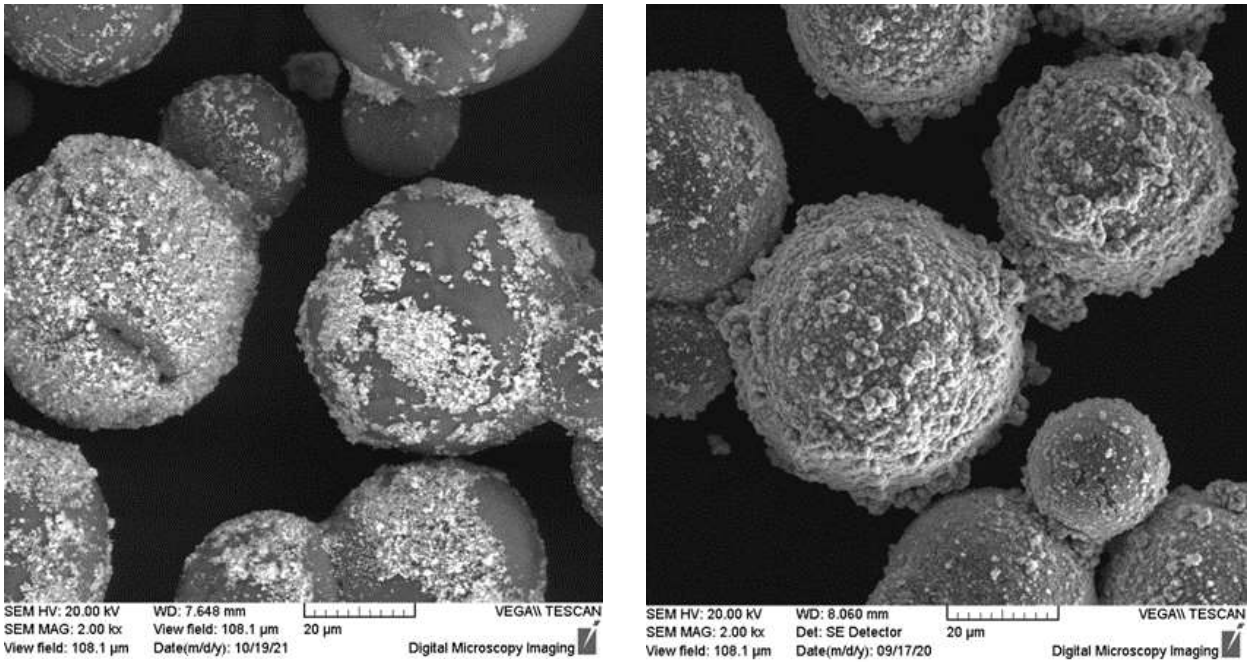


а **б**

Рис. 1. Гранулярный состав порошковых материалов оксида алюминия, плакированного никелем: 8 % (а) и 30 % (б).

При большем увеличении видна шероховатая поверхность плакированных оболочек исследуемых порошковых материалов (рис.2). Для порошка с 8 % Ni наблюдаются неравномерное плакирование (рис.2а). Большая часть микросфер плакирована никелем частично (рис.1а, 2а), хотя есть и частицы, целиком покрытые однородным по толщине слоем. Микрочастицы никеля в островковых отложениях имеют размер менее 1 мкм. Толщина целых оболочек составляет 3 - 5 мкм, при этом просматривается микроструктура зерен Al_2O_3 (с размером зерна 2 - 3 мкм) (рис.3а). Никелевые оболочки, не обладающие плотной упаковкой (рис.3а), имеют пониженную адгезионную прочность с частицами корунда.

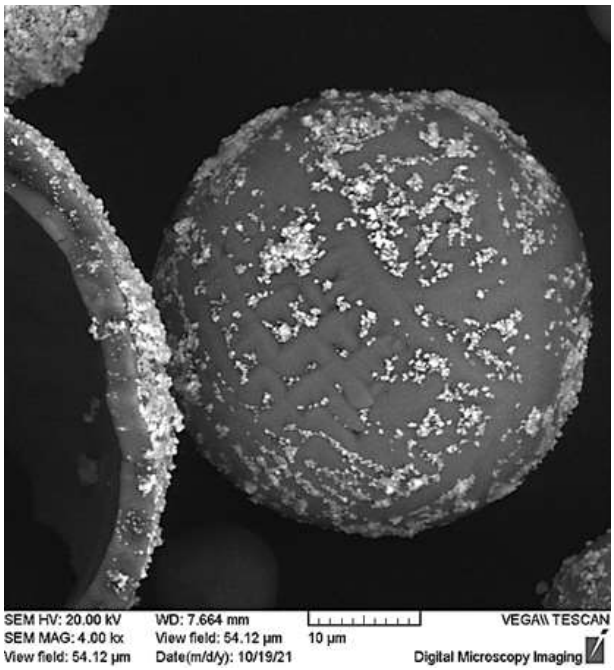
У порошка с 30 % Ni на поверхности керамических частиц никель образует плотную оболочку толщиной ~3 мкм (рис. 3б), на которой видны осевшие отдельные микрочастицы Ni размером 0,5 – 2 мкм, а также конгломераты из этих частиц размером ~5 мкм (рис.2б).



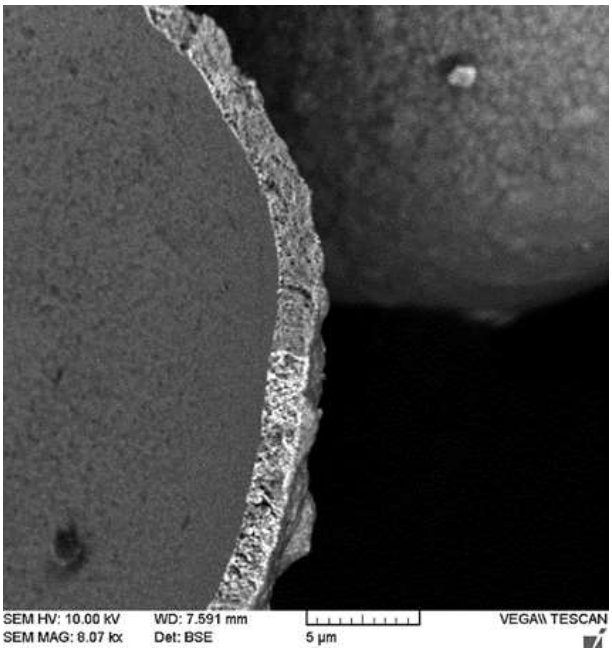
а **б**

Рис. 2. Плакированная оболочка на поверхности частиц оксида алюминия, плакированного 8 % (а) и 30 % (б) никеля.

Исследование распределения элементного состава подтвердило, что элементы Al и O сосредоточены в теле порошковых частиц, а Ni – в плакированной оболочке (рис. 4). Синхронное расположение рефлексов алюминия и кислорода на кривых распределения указывает на связанное состояние в виде оксида алюминия. В толще плакированной оболочки наблюдается всплеск интенсивности рефлекса никеля.

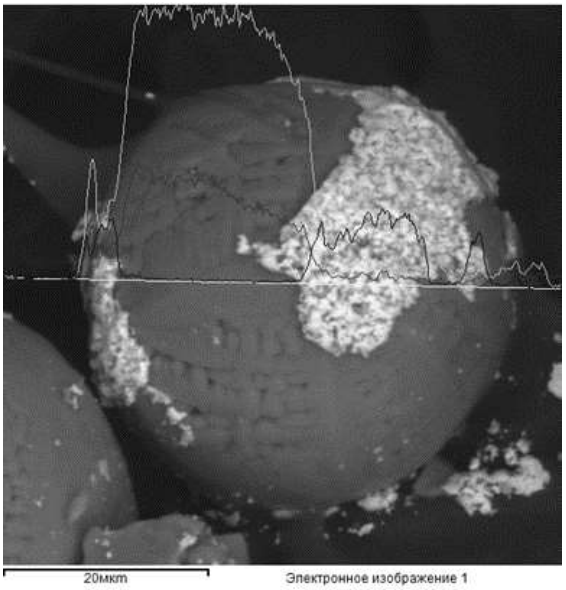


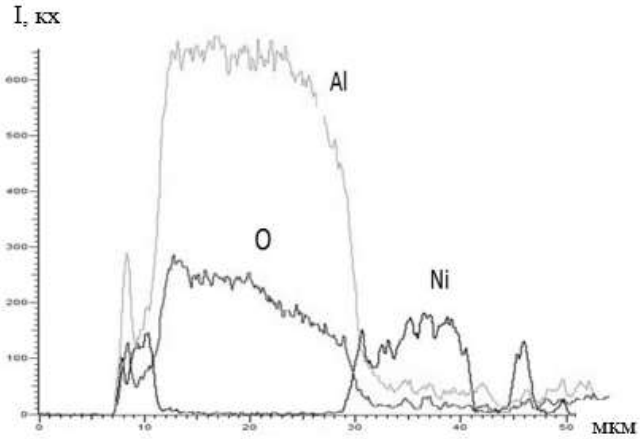
а



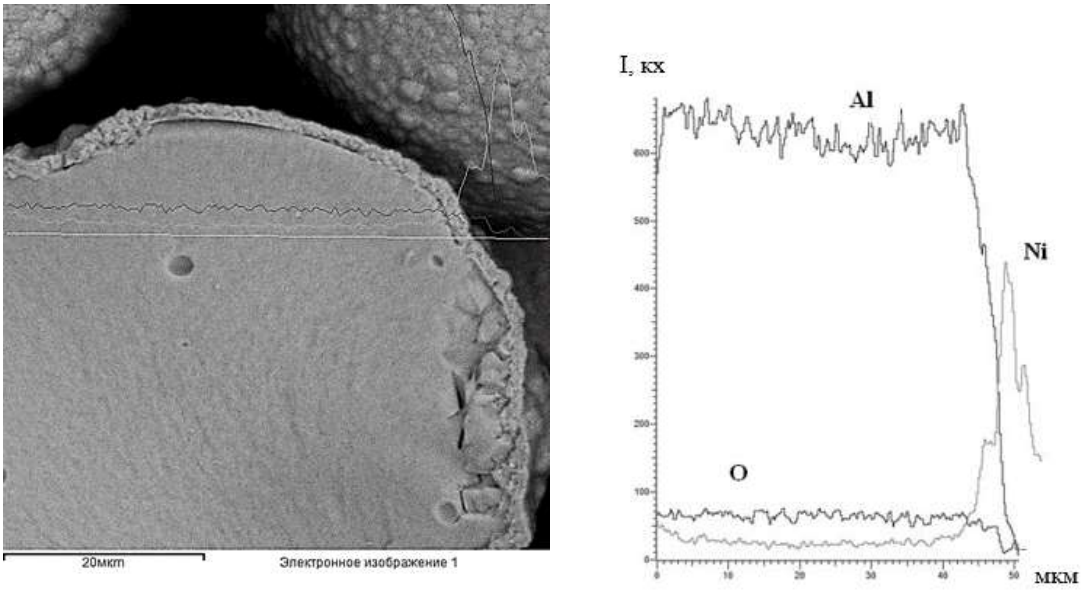
б

Рис. 3. Плакированная оболочка на поверхности частиц оксида алюминия, плакированного 8 % (а) и 30 % (б) никеля.





а



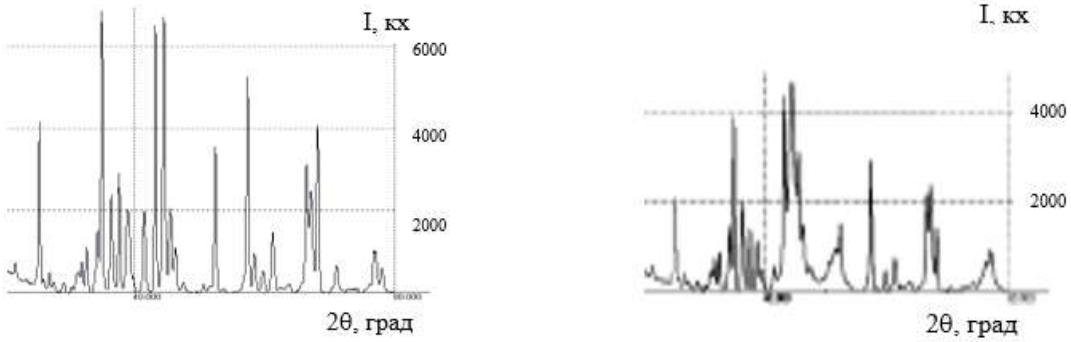
б

Рис. 4. Распределение основных элементов по ядру и плакирующей оболочке частиц порошковых материалов, плакированных 8 % Ni (а) и 30 % Ni (б).

Как показал рентгеноструктурный анализ, порошковые материалы в исходном состоянии имеет многофазный состав:

- (Ni + α-Al_2O_3 + γ-Al_2O_3 + γ*-Al_2O_3) – для порошка оксида алюминия, плакированного 8 % Ni (таблица 1). Рефлекс наибольшей интенсивности на дифрактограмме соответствует α-фазе оксида алюминия (корунду) (рис.5а, табл. 1);
- (Ni + α–Al_2O_3 + γ–Al_2O_3) – для порошка оксида алюминия, плакированного 30 % Ni (табл. 2). При этом рефлекс наибольшей интенсивности на дифрактограмме соответствует плакирующей металлической компоненте – никелю (рис. 5б, табл. 2), что обусловлено прохождением рентгеновских лучей через плакирующую оболочку порошковых частиц.

Совокупность нескольких оксидных фаз в теле частиц обусловлена основными технологическими факторами порошковой металлургии (температурой нагрева при спекании, давлением при прессовании и размоле).



а б

Рис. 5. Дифрактограммы порошковых материалов, плакированных 8 % Ni (а) и 30 % Ni (б).

Таблица 1

Угол отражения 2θ, град	Межплоскостное расстояние d, нм	Интенсивность рефлексов I, отн.ед.	Фаза
25,113	0,3522	0,55	α–Al_2O_3
26,691	0,3337	0,07	α–$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$
31,161	0,2876	0,08	γ–Al_2O_3
31,424	0,2845	0,11	γ*–Al_2O_3
32,082	0,2793	0,15	γ–Al_2O_3
33,923	0,2640	0,22	γ–Al_2O_3
34,580	0,2506	1,00	α–Al_2O_3
36,158	0,2487	0,34	α–$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$
37,078	0,2424	0,38	γ–Al_2O_3
38,393	0,2343	0,30	α–Al_2O_3
41,023	0,2202	0,30	γ–Al_2O_3
42,863	0,2112	0,96	α–Al_2O_3
44,178	0,2050	0,99	α–Al_2O_3
45,099	0,2013	0,29	Ni (111)
46,150	0,1966	0,16	γ–Al_2O_3
47,071	0,1932	0,03	γ–Al_2O_3
50,226	0,1818	0,03	γ*–Al_2O_3
51,936	0,1760	0,51	α–Al_2O_3
53,119	0,1724	0,02	Ni (200)
56,932	0,1616	0,71	α–Al_2O_3
57,984	0,1589	0,13	α–$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$
59,299	0,1557	0,07	α–Al_2O_3
60,745	0,1523	0,21	α–Al_2O_3
65,873	0,1417	0,47	γ*–Al_2O_3
66,530	0,1407	0,37	α–Al_2O_3
67,845	0,1381	0,54	γ–Al_2O_3
70,475	0,1336	0,09	α–Al_2O_3
76,523	0,1245	0,14	α–Al_2O_3
77,575	0,1231	0,09	Ni (220)

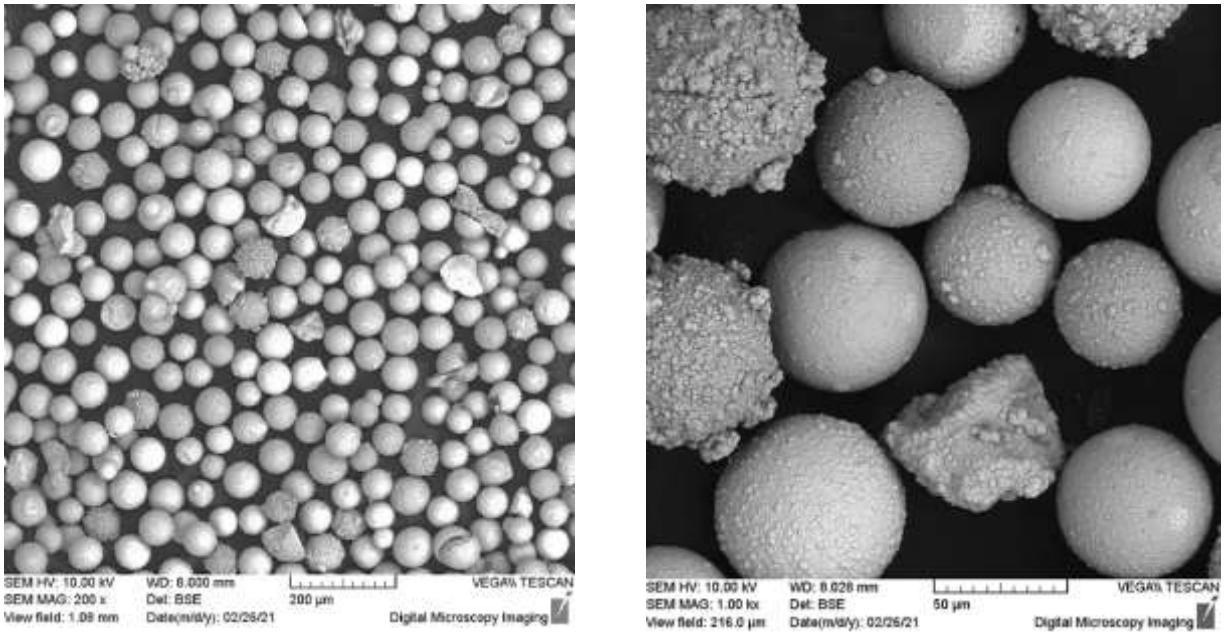
Таблица 2

Угол отражения 2θ, град	Межплоскостное расстояние d, нм	Интенсивность рефлексов I, отн.ед.	Фаза
21,432	0,4144	0,12	α–Al_2O_3
24,982	0,3569	0,41	α–Al_2O_3
26,428	0,3381	0,08	α–Al_2O_3
28,663	0,3121	0,04	α–Al_2O_3
31,293	0,2855	0,15	γ–Al_2O_3
33,791	0,2649	0,26	γ–Al_2O_3
34,449	0,2604	0,77	γ–Al_2O_3
35,895	0,2503	0,38	α–Al_2O_3
37,210	0,2416	0,03	γ–Al_2O_3
38,262	0,2350	0,22	α–Al_2O_3
39,050	0,2308	0,10	γ–Al_2O_3
41,023	0,2203	0,11	α–Al_2O_3
42,732	0,2118	0,86	α–Al_2O_3
43,915	0,2061	1,00	Ni (111)
45,099	0,2013	0,66	α–Al_2O_3
45,756	0,1982	0,31	γ–Al_2O_3
46,939	0,1937	0,11	γ–Al_2O_3
50,095	0,1822	0,13	γ–Al_2O_3
51,015	0,1789	0,19	α–Al_2O_3
52,067	0,1756	0,32	Ni (200)
56,932	0,1616	0,62	α–Al_2O_3
59,167	0,1561	0,09	α–Al_2O_3
60,614	0,1526	0,15	γ–Al_2O_3
63,243	0,1471	0,04	α–Al_2O_3
65,741	0,1420	0,45	α–Al_2O_3
66,793	0,1402	0,48	γ–Al_2O_3
67,714	0,1384	0,29	γ–Al_2O_3
75,734	0,1256	0,13	α–Al_2O_3
76,392	0,1247	0,19	Ni (220)

Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено, что при плакировании 8 % никеля порошкового материала оксида алюминия не происходит формирования цельной оболочки, поэтому островковое покрытие никеля на микросферах не обладает высокой адгезионной прочностью. Увеличение плакирования до 30 % способствует формированию плотной металлической оболочки на микросферах матричного материала с высокой адгезионной прочностью и равномерным распределением основных компонентов по внутреннему сечению частиц.

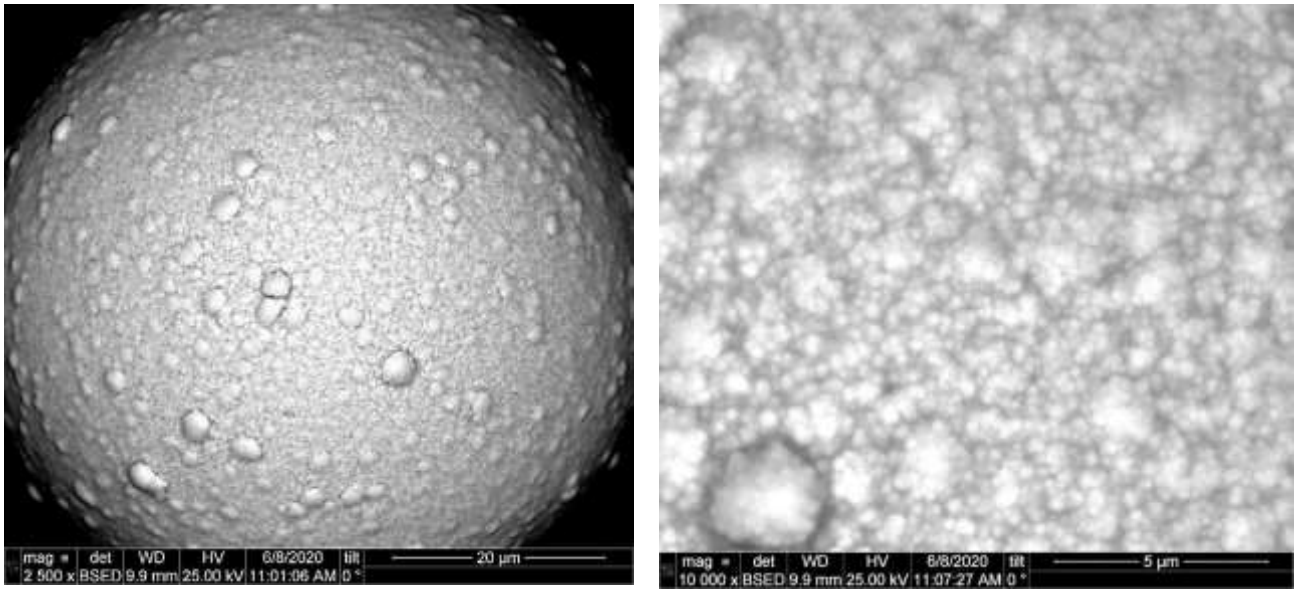
Дальнейшие исследования были продолжены на опытной партии нового порошкового материала марки ОЦН30 на основе диоксида циркония, стабилизированного (7±1) % оксида иттрия, со сфероидальной формой частиц, плакированных 30 % никеля [11]. Данный порошковый материал относится к группе керамик для плазменного напыления теплозащитных покрытий, предназначенных для повышения долговечности деталей, работающих при высоких температурах. В качестве исходного матричного порошка был выбран материал марки Z7Y40-60S, полученный способом порошковой металлургии (основные технологические операции: высокотемпературное спекание, дробление, сфероидизация). Процесс химического плакирования осуществлялся методом восстановления (из растворов солей с помощью гипофосфита натрия).

Порошок имеет однородную консистенцию и серый цвет частиц. Гранулярный состав составляет 40/60 мкм (рис.6). Частицы порошка имеют цельное строение и сферическую форму, но встречаются отдельные частицы неправильной формы (рис. 6а). При большем увеличении видна шероховатая поверхность плакированной оболочки (рис. 6б), на которой осели отдельные микрочастицы никеля (размером 0,2 – 0,5 мкм), а также конгломераты (размером ~2,83 мкм) из микрочастиц (рис. 7).



а **б**

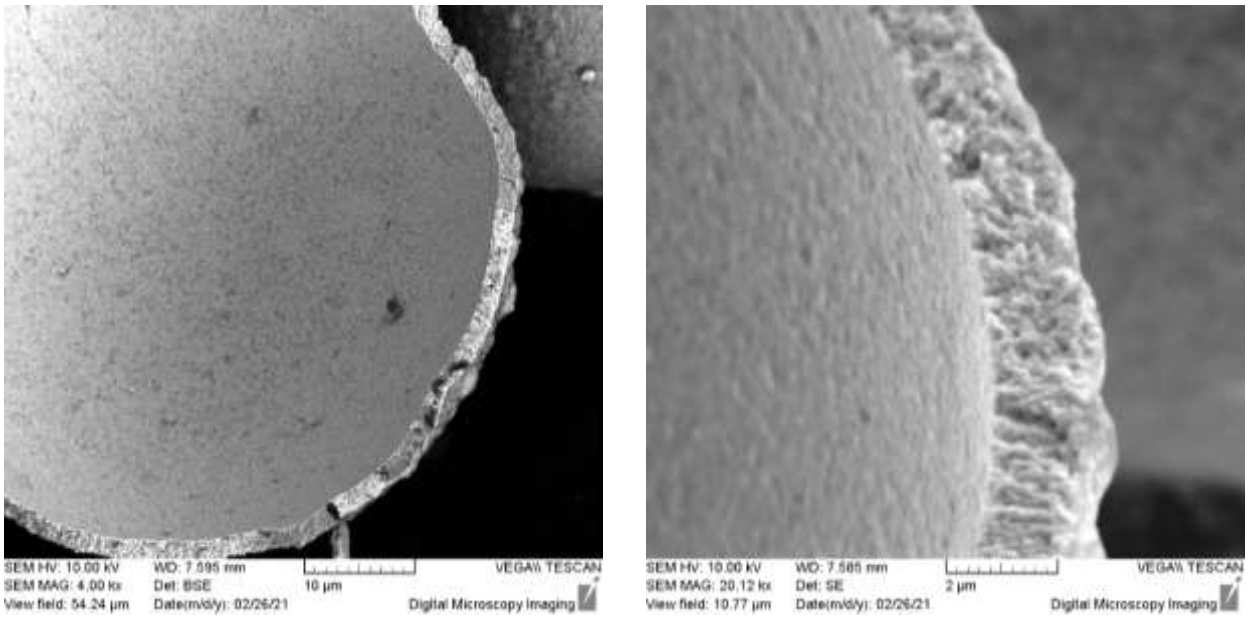
Рис. 6. Гранулярный состав (а) и морфология (б) поверхности частиц порошкового материала диоксида циркония, плакированного 30 % никеля.



а б

Рис. 7. Микроструктура поверхности плакированной оболочки никеля.

При механическом размоле частиц порошка обнажается внутренняя микроструктура ядра и оболочки (рис. 8). Частицы никеля образуют вокруг керамических частиц плотную металлическую оболочку толщиной ~ 2 мкм.



а б

Рис. 8. Микроструктура ядра и плакированной оболочки частиц порошкового материала.

Элементный состав порошкового материала во многом определяет его назначение. Химический состав исходного матричного порошка, предназначенного для нанесения теплозащитных покрытий, представляет собой совокупность следующих компонентов: оксид иттрия (Y_2O_3) – (7,0±1,0) %; оксид железа (Fe_2O_3) – 0,05 %; оксид кремния (SiO_2) – 0,05 %; оксид алюминия (Al_2O_3) – 0,05 %; оксид титана (TiO) – 0,02 %; оксид циркония (ZrO_2) – остальное.

Химический анализ, проведенный в плакированной оболочке, показал высокое содержание никеля (рис. 9, табл. 3). Также зафиксировано небольшое количество (4,08 вес. %) фосфора. Следует отметить, что характерной особенностью при химическом плакировании является одновременное с металлом восстановление этой примеси, осаждающейся в плакирующей оболочке. Поэтому получить оболочку из чистого никеля данным методом достаточно сложно.

Таблица 3

Элемент	Вес. %	Атом. %
Ni	95,92	92,54
P	4,08	7,46
сумма	100,00	100,00

Анализ распределения основных элементов, проведенный по поперечному сечению порошин, показал синхронный всплеск рефлексов циркония и кислорода, что подтверждает наличие соединения оксида циркония. При переходе из ядра в плакированную оболочку наблюдается всплеск рефлекса никеля (рис. 10).

На рисунке 11 методом визуализации показано распределение основных элементов в частицах исследуемого порошкового материала. Атомы кислорода и оксидообразующих элементов равномерно распределены по телу ядра. Никель осажден в виде плотной оболочки на сферической поверхности керамических частиц.

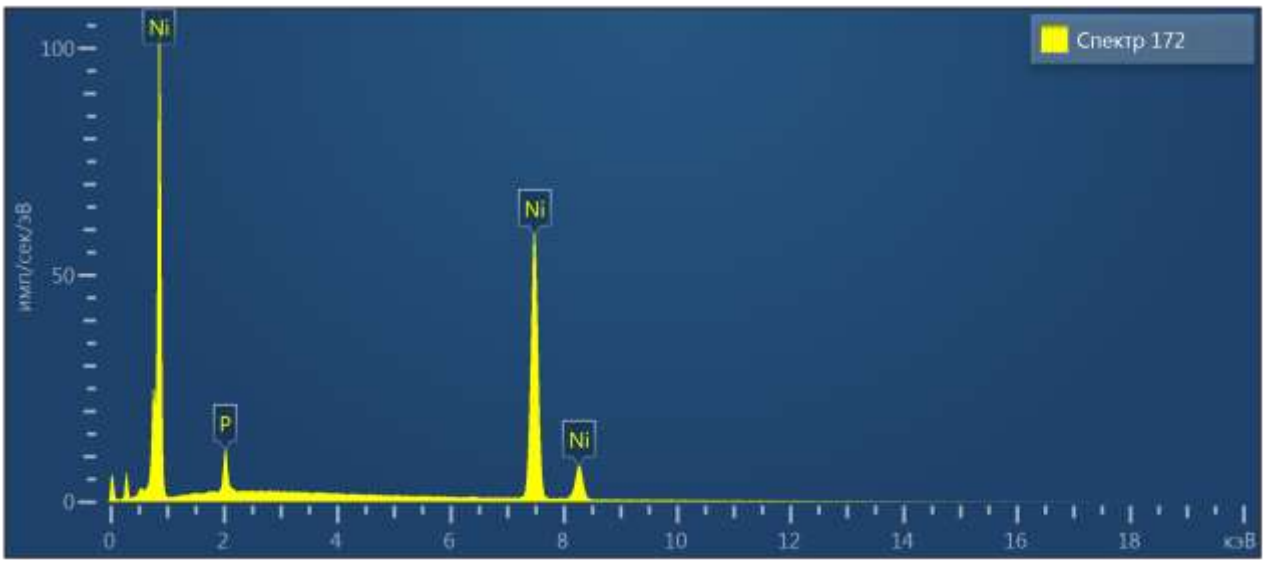


Рис. 9. Спектрограмма элементного состава оболочки никеля.

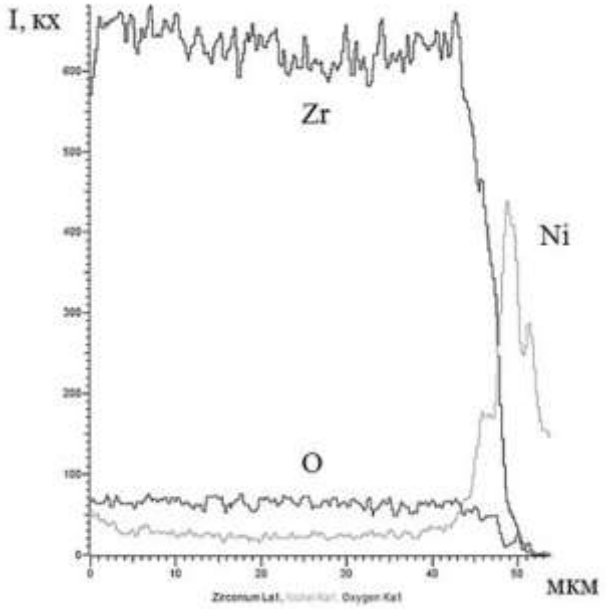


Рис. 10. Распределение основных элементов в ядре и плакирующей оболочке частиц порошка.

Исследуемый порошок представляет собой композиционный материал, состоящий из твердых частиц диоксида циркония, покрытых по всей поверхности плотной пленкой никеля. По результатам расшифровки дифрактограммы (рис. 12) он имеет двухфазный состав (T-ZrO_2 + Ni) (табл. 4). Рефлекс наибольшей интенсивности на дифрактограмме соответствует тетрагональной фазе T-ZrO_2. Оксидные частицы имеют тетрагональную кристаллическую решетку, где атомы иттрия местами замещают атомы циркония в решётке диоксида циркония. Этим достигается стабилизация тетрагональной кристаллической решетки, что положительно сказывается на жаростойких свойствах матричного компонента. Наличие рефлексов никеля на дифрактограмме объясняется прохождением рентгеновских лучей через металлическую оболочку порошковых частиц.

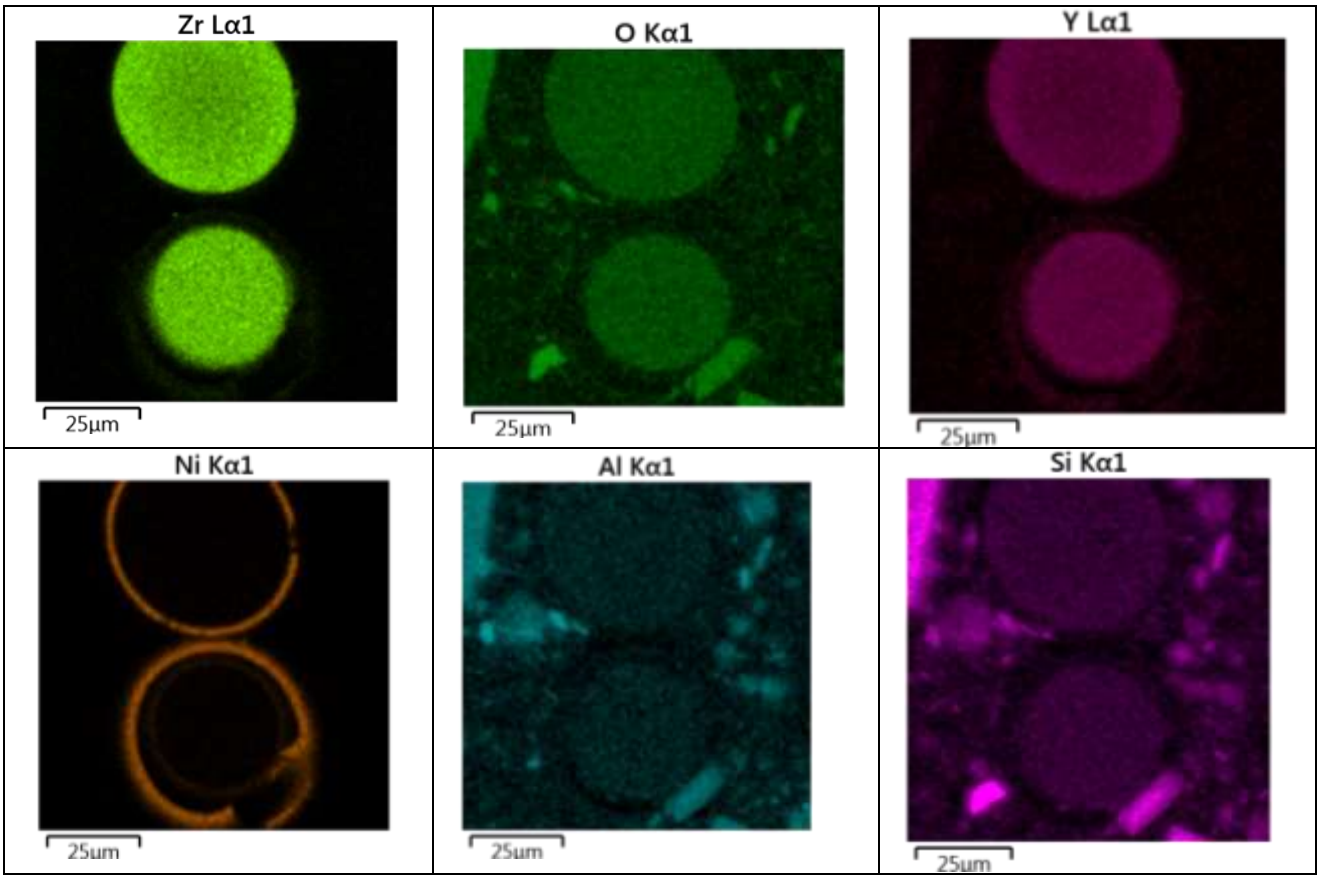


Рис. 11. Распределение основных элементов по поперечному сечению частиц порошкового материала.

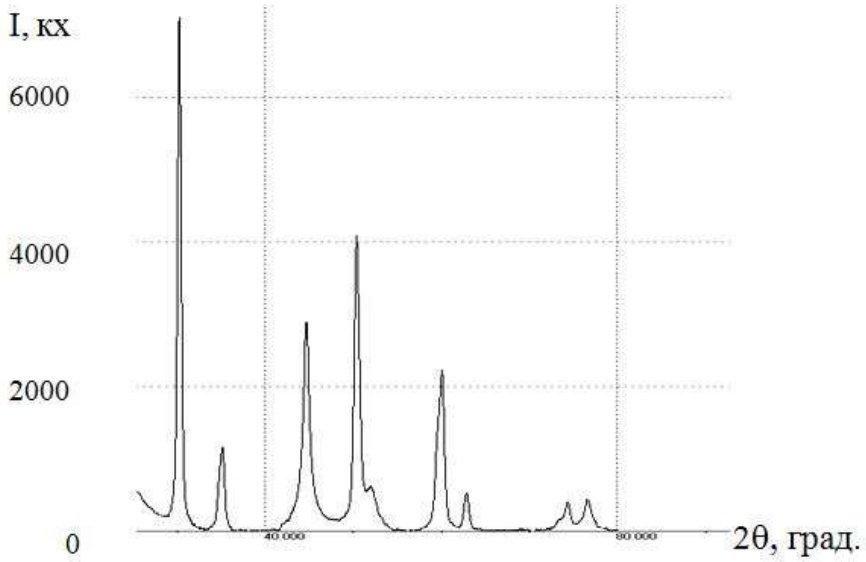


Рис. 12. Дифрактограмма порошкового материала диоксида циркония, плакированного никелем.

Таблица 4

Угол дифракции 2θ, град	Межплоскостное расстояние d, нм	Интенсивность рефлексов I, отн. ед.	Фаза, индексы плоскостей (hkl)
29,462	0,3035	1,00	T-ZrO_2 (111)
34,513	0,2596	0,16	T-ZrO_2 (002)
44,053	0,2056	0,41	Ni (111)
50,226	0,1818	0,56	T-ZrO_2 (202)
51,489	0,1776	0,09	Ni (200)
59,486	0,1554	0,31	T-ZrO_2 (113)
62,432	0,1488	0,17	T-ZrO_2 (222)
72,954	0,1298	0,02	T-ZrO_2 (004)
73,665	0,1287	0,06	T-ZrO_2 (400)
75,900	0,1253	0,06	Ni (220)

Как показали проведенные исследования, по структурно-фазовому составу новый порошковый материал отечественного производства является аналогом порошкового материала марки Metco 204NS (производства фирмы «Sulzer Metco») и за счет плакирования никелем будет способствовать улучшению пластичности напыляемого покрытия, а также предотвращения от окисления подслоя при высоких температурах.

4. Заключение. Плакирование 30 % никеля порошковых материалов оксида алюминия и циркония позволяет успешно наносить покрытие Ni в виде плотной металлической оболочки на микросферы матричного материала с высокой адгезионной прочностью и равномерным распределением основных компонентов по внутреннему сечению частиц.
Исследованные отечественные порошки по своему структурно-фазовому состоянию являются конкурентоспособными материалами по отношению к зарубежным аналогам. Они рекомендованы для плазменного напыления многофункциональных покрытий и могут быть востребованы в энергетике, металлургии, машиностроении и оборонной промышленности для повышения долговечности и надежности наиболее ответственных деталей.

Список литературы

1. Lima R.S., Marple B.R. Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powders for Structural, Thermal Barrier and Biomedical Applications: A Review // J. Thermal Spray Technology. - 2007. - No. 16(1). - P. 40–63. DOI: 10.1007/s11666-006-9010-7
2. Бобкова Т.И., Григорьев А.А., Жиров Д.С. Разработка композиционных порошков и покрытий для защиты и восстановления изделий, претерпевающих существенное температурное воздействие в процессе эксплуатации // Вопросы материаловедения. – 2020. – № 3(103). – С. 70–78. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-103-3-70-78
3. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S., Berndt C.C., Kottada R. S., Ming Ang A. S. Thermal spray high-entropy alloy coatings: A Review // J. of thermal spray technology. – 2020. - No. 29. - P. 857–893. DOI: 10.1007/s11666-020-01047-0

4. Olhero S.M., Torres P.M.C., Mesquita-Guimarãesb J., Baltazar J., Pinho-da-Cruz J., Gouveia S. Conventional versus additive manufacturing in the structural performance of dense alumina-zirconia ceramics: 20 years of research, challenges and future perspectives // Journal of Manufacturing Processes. - 2022. - Vol. 77. - P. 838-879. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.041
5. Oguntuyi S. D., Johnson O. T., Shongwe M. B., Jeje S. O., Rominiyi A. L. The effects of sintering additives on the ceramic matrix composite of ZrO2: microstructure, densification, and mechanical properties – a review // Advances in Applied Ceramics. - 2021. - Vol. 120, Iss. 5-8. - P. 319–335. DOI: 10.1080/17436753.2021.1953845
6. Шеховцов В.В., Волокитин В.Г., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.П., Аньшаков А.С., Кузьмин В.И. Влияние термической плазмы на образование керамических микросфер. Часть 1. Характер нагрева и испарения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 5. - С. 143–150. URL: https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/349
7. Геращенкова Е.Ю., Васильев А.Ф., Самоделкин Е.А., Фармаковский Б.В. Технология получения композиционного наноструктурированного порошка для нанесения защитных покрытий // Вопросы материаловедения. – 2020. – №. 1(101). – С. 97–103. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-97-103
8. Геращенкова Е.Ю., Бобкова Т.И., Самоделкин Е.А., Фармаковский Б.В. Композиционные плакированные порошки для нанесения защитных покрытии // Вопросы материаловедения. – 2019. – №. 1(97). – С. 59–64. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-97-1-59-64
9. Самоделкин Е.А., Коркина М.А., Фармаковский Б.В., Земляницын Е.Ю. Получение плакированного порошка на дезинтеграторе с новой конструкцией ротора // Вопросы материаловедения. – 2019. – №. 4(100). – С. 91–96. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-100-4-91-96
10. Козырева Л.В., Козырев В.В., Крекова И.С. Экологически безопасная технология получения плакированного порошка технической керамики // Перспективные материалы. – 2020. – №. 6. – С. 64–72. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-6-64-72
11. Справочник порошковых материалов для газотермического напыления. – ООО «Имхотеп», 2020. https://accormetall.ru/catalog

References

1. Lima R.S., Marple B.R. Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powders for Structural, Thermal Barrier and Biomedical Applications: A Review // J. Thermal Spray Technology. – 2007. - No. 16(1). - P. 40–63. DOI: 10.1007/s11666-006-9010-7
2. Bobkova T.I., Grigoriev A.A., Zhirov D.S. Development of composite powders and coatings for protection and restoration of products under significant temperature exposure during operation // Voprosy Materialovedeniya. - 2020. - No. 3(103). - P. 70–78. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2020-103-3-70-78 (in Russian)
3. Meghwal A., Anupam A., Murty B.S., Berndt C.C., Kottada R. S., Ming Ang A. S. Thermal spray high-entropy alloy coatings: A Review // J. of thermal spray technology. – 2020. - No. 29. - P. 857–893. DOI: 10.1007/s11666-020-01047-0

4. Olhero S.M., Torres P.M.C., Mesquita-Guimarãesb J., Baltazar J., Pinho-da-Cruz J., Gouveia S. Conventional versus additive manufacturing in the structural performance of dense alumina-zirconia ceramics: 20 years of research, challenges and future perspectives // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. - Vol. 77. - P. 838-879. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.041
5. Oguntuyi S. D., Johnson O. T., Shongwe M. B., Jeje S. O., Rominiyi A. L. The effects of sintering additives on the ceramic matrix composite of ZrO2: microstructure, densification, and mechanical properties – a review // Advances in Applied Ceramics. – 2021. - Vol. 120, Iss. 5-8. - P. 319–335. DOI: 10.1080/17436753.2021.1953845
6. Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Anshakov A.A., Kuzmin V.I. Thermal Plasma Effect on Ceramic Microsphere Formation. Part 1. Heating and Evaporation // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2017. - No. 5. - P. 143–150. https://vestnik.tsuab.ru/jour/article/view/349 (in Russian)
7. Geraschenkova E.Yu., Vasiliev A.F., Samodelkin E.A., Farmakovsky B.V. Technology for producing composite nanostructured powder for protective coatings // Voprosy Materialovedeniya. – 2020. - No. 1(101). - P. 97–103. DOI: 10.22349/1994-6716-2020-101-1-97-103 (in Russian)
8. Gerashchenkova E.Yu., Bobkova T.I., Samodelkin E.A., Farmakovsky B.V. Composite cladded powders for spraying of protective coatings // Voprosy Materialovedeniya. – 2019. - No. 1(97). - P. 59–64. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-97-1-59-64 (in Russian)
9. Samodelkin E.A., Korkina M.A., Farmakovsky B.V., Zemlyanitsyn E.Yu. Producing clad powder by disintegrator with new rotor design // Voprosy Materialovedeniya. – 2019. - No. 4(100) - P. 91–96. https://doi.org/10.22349/1994-6716-2019-100-4-91-96 (in Russian)
10. Kozyreva L.V., Kozyrev V.V., Krekova I.S. Environment safety technology of creating coated powder of technical ceramics // Perspektivnye materialy. – 2020. - No. 6. - P. 64–72. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-6-64-72 (in Russian)
11. Handbook of powder materials for thermal spraying. - OOO «Imhotep», 2020. URL: https://accormetall.ru/catalog (in Russian).

Дата поступления: 20 сентября 2022 г.