

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 2, 2021

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.2.01
УДК 546.831.4:546.766

С.Е. Порозова¹, Д.А. Старков², К.Н. Лебедева¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²ОДК – Пермские моторы, Пермь, Россия

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ZrO_2
ОКСИДНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ХРОМА

Представлена сравнительная характеристика результатов модификации поверхности порошков ZrO_2 , стабилизированных Y_2O_3 , пропиткой водным раствором CrO_3 с последующей термической обработкой. В качестве исследуемых порошков использовали промышленные порошки ZYO-7-10-80, TZ-3Y-E и лабораторный порошок, синтезированный в Научном центре порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета, – ZrO_2 -5 мас. % Y_2O_3 . Для модификации поверхности выбрали вариант пропитки 10%-ным водным раствором оксида шестивалентного хрома с последующим прокаливанием при значениях температуры 270, 400 и 700 °C в течение 1 ч на воздухе. Фазовый состав полученных порошков определяли методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии). По данным КР-спектроскопии выяснили, что все порошки представляют собой смеси тетрагональной и моноклинной модификаций. Содержание моноклинной модификации в порошке ZYO-7-10-80 при прокаливании практически неизменно (10–12 %). Этот результат можно объяснить тем, что количество стабилизатора – оксида иттрия – в порошке достаточно высокое – 7 мас. %, т.е. порошок близок к кубической модификации и, соответственно, содержит в основном тетрагональную фазу, не превращаемую в моноклинную. Содержание моноклинной модификации в порошке TZ-3Y-E – 31–38 %, лабораторном порошке ZrO_2 -5 мас. % Y_2O_3 – 51–58 %. Можно утверждать, что происходит частичная потеря стабилизатора и образование новых соединений. На поверхности диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, после пропитки водным раствором CrO_3 и прокаливания идентифицируются пики CrO_3 , Cr_2O_3 и промежуточных фаз. На спектре порошка ZYO-7-10-80 зафиксированы также пики циркона. При низких значениях температуры отмечено образование высокотемпературного соединения $YCrO_4$, что может быть объяснено его структурной близостью к циркону.

Ключевые слова: модификация поверхности, ультрадисперсные порошки, пропитка, фазовый состав, КР-спектроскопия, оксид иттрия, моноклинная модификация, диоксид циркония, спектральные характеристики, тетрагональная модификация.

S.E. Porozova¹, D.A. Starkov², K.N. Lebedeva¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²UEC – Perm Engines, Perm, Russian Federation

SURFACE MODIFICATION OF ULTRAFINE ZrO_2 POWDERS
CHROMIUM OXIDE COMPOUNDS

The paper presents a comparative characteristic of the results of surface modification of ZrO_2 powders stabilized with Y_2O_3 by impregnation with an aqueous solution of CrO_3 followed by heat treatment. The studied powders were industrial powders ZYO-7-10-80, TZ-3Y-E and laboratory powder synthesized at the Research Center of Powder Materials Science of the Perm National Research Polytechnic University – ZrO_2 -5 wt% Y_2O_3 . To modify the surface, we chose the option of impregnation with a 10 % aqueous solution of hexavalent chromium oxide, followed by calcination at temperatures of 270, 400, and 700 °C for 1 h in air. The phase composition of the obtained powders was determined by Raman spectroscopy (Raman spectroscopy). According to Raman spectroscopy data, it was found that all powders are mixtures of tetragonal and monoclinic modifications. The content of the monoclinic modification in the ZYO-7-10-80 powder during calcination is practically unchanged (10–12 %); this result can be explained by the fact that the amount of the stabilizer – yttrium oxide – in the powder is rather high, 7 wt. %, which means that the powder is close to the cubic modification and, accordingly, contains mainly a tetragonal phase that cannot be converted into a monoclinic one. The content of monoclinic modification in TZ-3Y-E powder is 31–38 %, laboratory ZrO_2 powder – 5 wt. % Y_2O_3 -51–58 %, it can be argued that there is a partial loss of the stabilizer and the formation of new compounds. On the surface of zirconium dioxide stabilized with yttrium oxide, after impregnation with an aqueous solution of CrO_3 and calcining, the peaks of CrO_3 , Cr_2O_3 and intermediate phases are identified. The spectrum of the ZYO-7-10-80 powder also shows peaks of zircon. At low temperatures, the formation of a high-temperature compound $YCrO_4$ is noted, which can be explained by its structural similarity to zircon.

Keywords: surface modification, ultrafine powders, impregnation, phase composition, Raman spectroscopy, yttrium oxide, monoclinic modification, zirconium dioxide, spectral characteristics, tetragonal modification.

Введение

Модификация поверхности частиц ультрадисперсных порошков – распространенный метод влияния на их поведение при консолидации. Так, в 1974 г. Н.С. Ениколоповым был предложен принципиально новый способ получения композиционных материалов – полимеризационное наполнение [1], позволяющее получать композиты с равномерным распределением частиц в матрице как при низком, так и при сверхвысоком содержании микронных и наноразмерных наполнителей [2]. В настоящее время метод активно разрабатывается и считается наиболее перспективным для получения различных типов многокомпонентных полимерных композиций [3]. В технологиях получения материалов на основе диоксида кремния часто применяют нанесение на поверхность частиц полимерных, этерифицирующих, неорганических покрытий [4]. Поверхность при этом приобретает гидрофильные или гидрофобные свойства, меняются ее заряд и рельеф.

Важным результатом модификации поверхности является изменение межфазного взаимодействия в расплавах, так как от адгезии поверхности фаз зависит сама возможность образования композиционного материала. Так, например, в лазерной порошковой наплавке на металлическую основу, широко применяемой при восстановительном ремонте различных деталей [5], в качестве наплавляемого порошка используются как чистые порошки железа и сталей, никеля, кобальта и их сплавов [6], так и композиции металлических порошков с порошками карбидов титана, ванадия или вольфрама [7]. Лазерная наплавка композиционных покрытий в значительно более широких пределах, чем наплавка чистых металлов, может обеспечить получение покрытий и деталей, обладаю-

щих такими характеристиками, как жаростойкость, коррозионная стойкость, хорошие трибологические свойства, высокая трещиностойкость. Однако большое значение при этом приобретает распределение добавки керамического порошка в слоях композиционного покрытия и адгезионные взаимодействия на границе компонентов.

Результат модификации поверхности зависит и от того, какие характеристики имели исходные порошки. Ранее такие исследования были проведены авторами [8] на порошках диоксида титана с получением на их поверхности оксидов никеля или металлического никеля. Цель представленной работы – сравнительная характеристика результатов модификации поверхности порошков ZrO_2 , стабилизированных Y_2O_3 , пропиткой водным раствором CrO_3 с последующей термической обработкой.

Экспериментальная часть

В качестве исследуемых порошков использовали промышленные порошки ЦИО-7-10-80, TZ-3Y-E и лабораторный порошок, синтезированный [9] в Научном центре порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета (НЦ ПМ ПНИПУ), – ZrO_2 –5 мас. % Y_2O_3 . В табл. 1 приведена общая характеристика исходных порошков.

Удельную поверхность порошков определяли методом тепловой десорбции азота на приборе СОРБИ 4.1 (ЗАО «МЕТА», г. Новосибирск). Средний размер частиц рассчитывали по известной формуле [10].

Фазовый состав полученных образцов изучали методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии) на многофункциональном спектрометре Senterra (Bruker, Германия) при длине волны излучающего лазера 532 нм.

Таблица 1

Общая характеристика порошков

| Маркировка | ЦИО-7-10-80 | TZ-3Y-E | ZrO_2 –5 мас. % Y_2O_3 |
|---|---|----------------------------|----------------------------|
| | № 1 | № 2 | № 3 |
| Происхождение | г. Екатеринбург, пос. Горный ЦИТ, ООО «ТСП» | TOSOH CORPORATION (Япония) | НЦ ПМ |
| Марка порошка | ТУ 1-595-2-659–2002. Марка ЦИО-7-10-80 | TZ-3Y-E | – |
| Содержание оксида иттрия, мас. % | 7 | 5 | 5 |
| Фазовый состав | T + M | T + M | T + M |
| Содержание моноклинной модификации, % | 7 | 23 | 17 |
| Форма агломератов | Осколочная | Сферическая | Осколочная |
| Удельная поверхность, м ² /г | 17 | 16 | 71 |
| Средний размер частиц, нм | 58 | 64 | 14 |

Примечание: Т – тетрагональная модификация; М – моноклинная модификация ZrO_2 .

Содержание моноклинной модификации определяют по соотношению интенсивности пиков моноклинной и тетрагональной модификаций [11–13] по следующей формуле:

$$f_m = [I_m^{181} + I_m^{192}] / [0,97(I_t^{148} + I_t^{264}) + I_m^{181} + I_m^{192}],$$

где верхние индексы относятся к комбинационному смещению характеристических пиков, а нижние индексы показывают принадлежность пика к моноклинной или тетрагональной фазе.

Агломераты нанопорошков до и после модифицирующей обработки исследовали на сканирующем электронном микроскопе VEGA3 TESCAN (TESCAN, Чехия).

Для модификации поверхности выбрали вариант пропитки 10%-ным водным раствором оксида шестивалентного хрома с последующим прокаливанием, выдержкой при перемешивании на магнитной мешалке 15–20 мин, фильтрацией, сушкой. Известно, что при нагревании выше 250 °С оксид хрома (VI) разлагается с выделением оксида хрома (III) и кислорода. Порошки прокаливали при значениях температуры 270, 400 и 700 °С в течение 1 ч.

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 приведены спектральные характеристики исходных порошков и отнесение пиков.

Таблица 2

Спектральные характеристики исходных порошков

| Маркировка порошков | | | Отнесение пиков | Источник |
|----------------------------------|-----|-----|--------------------|----------|
| № 1 | № 2 | № 3 | | |
| Волновые числа, см ⁻¹ | | | | |
| 148 | 147 | 149 | T | [12] |
| 178 | 176 | 174 | M | [11] |
| 190 | 187 | 186 | M | [11] |
| 259 | 258 | 252 | T | [12] |
| – | – | 305 | M | [11] |
| 321 | 329 | 329 | M, T | [11, 12] |
| 377 | 377 | 378 | M | [11] |
| 435 | – | – | ZrSiO ₄ | [14] |
| 463 | 469 | 467 | T | [12] |
| – | 554 | 531 | M | [11] |
| 638 | 635 | 622 | T, M | [11, 12] |
| 998 | – | – | ZrSiO ₄ | [14] |

Агломераты порошка № 1 (ЦИО-7-10-80) существенно крупнее – до 80 мкм [15]. Агломераты порошка № 2 (TZ-3Y-E) получены при распылительной сушке, порошка № 3 – при агломерационной обработке нанопорошка [16]. В вариантах № 2 и № 1, 3 мы имеем дело с двумя типами агломератов нанопорошков, поведение которых при консолидации приводит к различным результатам [16].

На рис. 1 в качестве примера приведены КР-спектры порошков № 2 и № 3. По данным КР-спектроскопии, все порошки представляют собой смеси тетрагональной и моноклинной модификаций. На спектре порошка № 1 зафиксированы также пики циркона [14].

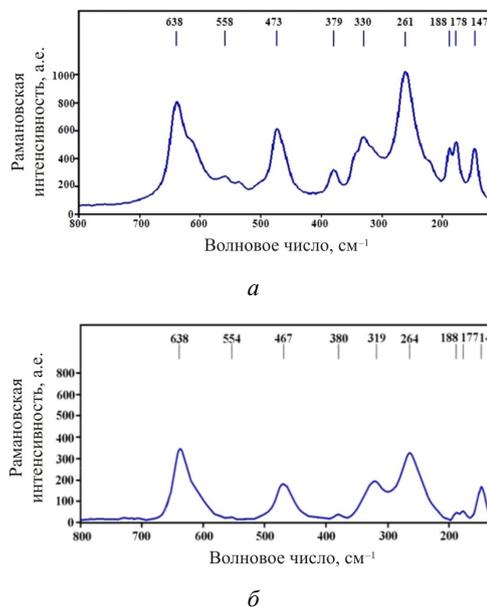


Рис. 1. КР-спектры порошков диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия: а – TZ-3Y-E; б – лабораторный порошок

Порошки прокаливали при значениях температуры 270, 400 и 700 °С в течение 1 ч на воздухе. Содержание моноклинной модификации в порошке № 1 при всех вариантах прокаливания остается практически неизменным (10–12 %). Этот результат можно объяснить тем, что количество стабилизатора – оксида иттрия – в порошке достаточно высокое – 7 мас. %, т.е. порошок по количеству стабилизатора близок к кубической модификации и, соответственно, содержит в основном тетрагональную фазу, не превращаемую в моноклинную. Содержание моноклинной модификации в порошках № 2 и № 3 существенно выше (31–38 и 51–58 %). Можно утверждать, что в ходе процессов нанесения покрытия и последующего прокаливания происходит частичная потеря стабилизатора и образование новых соединений. При этом значительно интенсивнее и широкий пик в области 800–1000 см⁻¹, где идентифицируются пики хромсодержащих оксидов.

На рис. 2 показаны КР-спектры, а на рис. 3 приведены СЭМ-изображения порошков после прокаливания при 700 °С. Спектральные характеристики порошков после прокаливания приведены в табл. 3. Область 800–1000 см⁻¹ в таблице выделена цветом.

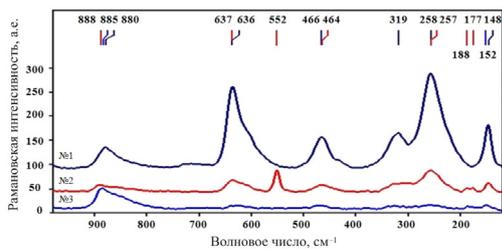


Рис. 2. КР-спектры порошков диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, после прокаливания при 700 °С. Нумерация спектров соответствует маркировке порошков

На всех спектрах идентифицируются линии тетрагональной и моноклинной модификаций диоксида циркония и выделяются линии CrO₃. Разложение до Cr₂O₃ не является активно происходящим процессом даже при возрастании температуры прокаливания. В нашем случае мы имеем дело с CrO₃ на поверхности носителя из диоксида циркония, а, например, возможность стабилизации CrO₃ на поверхности диоксида титана до температуры 900 °С ранее была отмечена другими авторами [17].

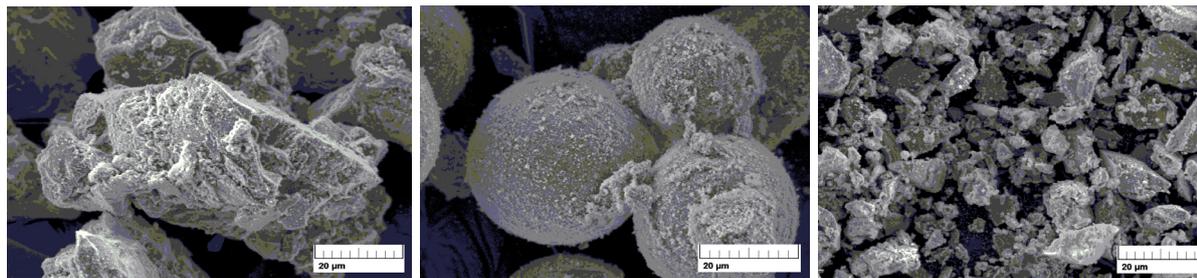


Рис. 3. СЭМ-изображения порошков диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, после прокаливания при 700 °С: а – № 1; б – № 2; в – № 3. Нумерация соответствует маркировке порошков

Таблица 3

Спектральные характеристики порошков после прокаливания

| Маркировка порошков | | | | | | | | | Отнесение пиков | Источник |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|----------|
| № 1 | | | № 2 | | | № 3 | | | | |
| Температура прокаливания порошков, °С | | | | | | | | | | |
| 270 | 400 | 700 | 270 | 400 | 700 | 270 | 400 | 700 | | |
| Положение линий спектров (волновое число), см ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| 148 | 145 | 151 | 147 | 145 | 148 | 149 | 150 | 152 | T | [12] |
| 178 | 176 | 176 | 176 | 176 | 177 | 174 | 174 | 174 | M | [11] |
| 190 | 189 | 189 | 187 | 187 | 187 | 186 | 185 | 186 | M | [11] |
| – | – | – | – | – | – | – | 215 | – | Cr ₂ O ₇ ²⁻ | [14, 18] |
| 259 | 258 | 258 | 258 | 258 | 258 | 252 | 258 | 256 | T, YCrO ₄ | [12, 19] |
| – | – | – | – | – | 289 | – | – | – | – | [14] |
| – | – | – | – | 296 | 296 | – | – | – | Cr ₂ O ₃ | [20] |
| – | – | – | – | – | – | 305 | – | – | M | [11] |
| – | 316 | – | – | – | 312 | – | – | – | T | [12] |
| 321 | – | 328 | 329 | 326 | 324 | 329 | – | 321 | T | [12] |
| – | – | – | – | – | 332 | – | 333 | – | M, Cr ₂ O ₃ | [11, 20] |
| 377 | 376 | – | 377 | 376 | – | 378 | 381 | – | M, | [11,] |
| 435 | 432 | – | – | – | 437 | – | – | – | ZrSiO ₄ | [14] |
| 463 | 465 | 468 | 469 | 470 | 456 | 467 | 469 | 471 | T, M | [11, 12] |
| – | 500 | – | 554 | – | 551 | 531 | – | – | YCrO ₄ , Cr ₂ O ₃ | [19–21] |
| 638 | 636 | 637 | 635 | 633 | 639 | 622 | 622 | 628 | T, M | [11, 12] |
| – | 708 | – | – | – | – | – | – | – | Cr ₂ O ₃ | [20] |
| – | – | – | – | – | 827 | – | – | – | Cr–O–Cr | [18] |
| – | – | – | – | – | 833 | – | – | – | Cr–O–Cr | [18] |
| – | – | – | – | – | 848 | – | – | – | Cr–O–Cr | [18] |
| 881 | 877 | 885 | 874 | 878 | 871 | 880 | 883 | 888 | Cr ₂ O ₃ /CrO ₃ | [17, 22] |
| – | – | – | – | – | 891 | – | – | – | – | |
| 945 | 947 | – | – | – | – | – | – | – | Cr ₂ O ₇ ²⁻ | [18] |
| 955 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | |
| 998 | 994 | – | – | 994 | – | – | – | – | ZrSiO ₄ | [14] |

Примечание: цветом выделена область волновых чисел оксидов хрома.

Наличие линий хромат- и бихромат-ионов показывает, что на поверхности не только присутствуют оксиды хрома, но и образуются их соединения с основным материалом. Для улучшения идентификации пиков в области $800\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ проведена операция разложения спектров с помощью программного обеспечения OPUS 65. В качестве примера на рис. 4 показано разложение в интервале $750\text{--}950\text{ см}^{-1}$ по алгоритму Левенберга – Марквардта с использованием функции Лоренца КР-спектра порошка № 3 после прокаливания при 700 °C . Разложение проводилось в полуавтоматическом режиме. Результаты разложения фрагментов КР-спектров приведены в табл. 4.

На поверхности диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, после пропитки водным раствором CrO_3 и прокаливания идентифицируются пики CrO_3 , Cr_2O_3 и промежуточных фаз. Разница в составе покрытий объясняется различной удельной поверхностью порошков и содержанием стабилизирующей добавки. Температура прокаливания несущественно изменяет полученные результаты. Переход CrO_3 в Cr_2O_3 значительно тормозится из-за высокой адгезии CrO_3 к оксидным поверхностям, в частности к поверхности ZrO_2 [17].

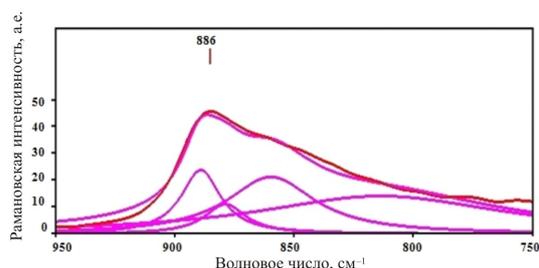


Рис. 4. Фрагмент спектра порошка № 3 после прокаливания при 700 °C . Разложение по алгоритму Левенберга – Марквардта

Таблица 4

Результаты разложения фрагментов спектров в интервале $750\text{--}950\text{ см}^{-1}$

| Маркировка порошков | | | | | | | | | Отнесение пиков | Источ-ник |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------------------------|-----------|
| № 1 | | | № 2 | | | № 3 | | | | |
| Температура прокаливания порошков, °C | | | | | | | | | | |
| 270 | 400 | 700 | 270 | 400 | 700 | 270 | 400 | 700 | | |
| Положение пиков (волновое число), см^{-1} | | | | | | | | | | |
| 763 | – | 759 | – | 760 | – | – | – | – | Cr–O–Cr | [18] |
| – | 828 | – | 829 | – | – | 822 | – | – | Cr–O–Cr | [18] |
| – | – | – | – | – | – | – | 837 | 837 | Cr–O–Cr | [18] |
| 840 | 848 | 840 | 843 | 841 | 840 | 843 | – | – | CrO_3 | [18] |
| – | – | 867 | 858 | 868 | 867 | 860 | 866 | 863 | YCrO_4 | [19] |
| 871 | 878 | – | 879 | – | – | 877 | – | 881 | $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{CrO}_3$ | [17, 22] |
| 886 | – | 883 | – | 887 | 891 | 890 | 886 | 891 | $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{CrO}_3$ | [17, 22] |
| 947 | 940 | – | 948 | – | – | – | – | – | $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ | [18] |
| – | 961 | – | – | – | – | – | – | – | $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ | [18] |

При наличии значительного количества пре-вращаемой тетрагональной фазы происходит взаимодействие CrO_3 со стабилизатором с образованием YCrO_4 и, возможно, нестехиометрических соединений YCrO_{4-x} [19, 23–25]. На наличие такого взаимодействия указывают не только данные КР-спектроскопии, но и увеличение содержания моноклинной модификации по сравнению с исходными порошками. Образование YCrO_4 при таких низких значениях температуры прокаливания представляет большой интерес. YCrO_4 известен как высокотемпературный материал с высокой химической устойчивостью. Структурно он близок к циркону, что, по-видимому, и объясняет легкость его образования на поверхности ZrO_2 . YCrO_4 относится к числу относительно редких оксидных материалов, являющихся ферромагнетиками. По литературным данным [19, 23–25], при повышении температуры кристаллическая решетка материала переходит в структуру типа шеелита и материал становится антиферромагнетиком. Появление такого соединения на поверхности способно существенно изменить свойства частиц ZrO_2 .

Выводы

На поверхности диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, после пропитки водным раствором CrO_3 и прокаливания идентифицируются пики CrO_3 , Cr_2O_3 и промежуточных фаз. Температура прокаливания несущественно изменяет полученные результаты. Переход CrO_3 в Cr_2O_3 значительно тормозится из-за высокой адгезии CrO_3 к оксидным поверхностям.

Отмечено образование высокотемпературного соединения YCrO_4 . На наличие такого взаимодействия указывают не только данные КР-спектроскопии, но и увеличение содержания моноклинной модификации по сравнению с исходными порошками. Образование YCrO_4 при низких значениях температуры на поверхности ZrO_2 может быть объяснено его структурной близостью к циркону. Появление такого соединения на поверхности способно существенно изменить свойства частиц ZrO_2 .

Список литературы

1. Иванчев С.С., Дмитренко А.В. Полимеризационное наполнение методом радикальной полимеризации как способ получения композиционных материалов // Успехи химии. – 1982. – Вып. 7. – С. 1178–1200.
2. Галашина Н.М. Полимеризационное наполнение как метод получения новых композиционных материалов (Обзор) // Высокомолекулярные соединения. – 1994. – Т. 36, № 4. – С. 640–650.
3. О возможности использования титан-магниевого нанокатализатора в процессе полимеризационного напол-

нения полиолефинов и некоторых свойствах полученных композитов / Е.М. Харьковская, Д.И. Менделеев, О.В. Сметанников, М.С. Чинова, А.В. Иванюк, Е.М. Антипов // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 2014. – Т. 56, № 5. – С. 496–507. DOI: 10.7868/S2308113914050064

4. Айлер Р. Химия кремнезема: Растворимость, полимеризация, коллоидные и поверхностные свойства: в 2 ч. / пер. с англ. Л.Т. Журавлева; под ред. В.П. Прянишникова. – М.: Мир, 1982. – 1127 с.

5. Лазерная наплавка как перспективный метод упрочнения штамповой оснастки / Ф. Берtrand, И. Мовчан, М.Н. Самодурова, Н.С. Джигун // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 44–52. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52

6. Гусев А.А., Гусева Г.В. Наплавка чистого металлического порошка импульсным лазерным излучением // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 6. – С. 254–259.

7. Григорьянц А.Г., Новиченко Д.Ю., Смуров И.Ю. Лазерная аддитивная технология изготовления покрытий и деталей из композиционного материала // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – № 7. – С. 38–46.

8. Порозова С.Е., Старков Д.А. Влияние добавки диоксида титана на пористость наплавленного материала на основе порошка жаропрочного никелевого сплава // Конструкции из композиционных материалов. – 2019. – № 1. – С. 3–6.

9. Анциферов В.Н., Порозова С.Е., Кульметьева В.Б. Влияние добавок водорастворимых полимеров на фазовый состав и размеры частиц диоксида циркония при осаждении из растворов солей // Физика и химия стекла. – 2012. – Т. 38, № 3. – С. 402–408.

10. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Мир, 1984. – 306 с.

11. Synthesis, microstructure and optical characterization of zirconium oxide nanostructures / Latha Kumari, G.H. Du, W.Z. Li, R. Selva Vennila, S.K. Saxena, D.Z. Wang // Ceramics International. – 2009. – Vol. 35, iss. 6. – P. 2401–2408. DOI: 10.1016/j.ceramint.2009.02.007

12. Nanocrystalline zirconia-yttria system—a Raman study / A. Ghosh, A.K. Suri, M. Pandey, S. Thomas, T.R. Rama Mohan, B.T. Rao // Materials Letters. – 2006. – Vol. 60, iss. 9–10. – P. 1170–1173. DOI: 10.1016/j.matlet.2005.10.102

13. Study on structural evolution of nanostructured 3 mol % yttria stabilized zirconia coatings during low temperature ageing / B. Liang, C. Ding, H. Liao, C. Coddet // Journal of the European Ceramic Society. – 2009. – Vol. 29, iss.11. – P. 2267–2273. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.01.002

14. Кожевников В.Н., Ивашевская С.Н., Кевлич В.И. Геохимия и рамановские спектры цирконов из рудных (PGE-Au) амфиболитов массива Травяная Губа, Северная Карелия // Труды Карельского научного центра РАН. – 2015. – № 7. – С. 36–53. DOI: 10/17076geo136

15. Ильинкова Т.А., Барсукова Е.А., Тагиров А.Т. Взаимосвязь характеристик порошковых материалов и механических свойств плазменных теплозащитных покрытий // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 15. – С. 116–121.

16. Роль агломератов нанопорошков в формировании структуры и свойств керамических материалов / С.Е. Порозова, В.Б. Кульметьева, Т.Ю. Поздеева, В.О. Шоков // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2020. – № 4. – С. 4–13. DOI.org/10.17073/1997-308X-2020-4-4-13

17. Hurley B.L., McCheery R.L. Raman spectroscopy of monolayers formed from chromate corrosion inhibitor on copper surfaces // Journal of The Electrochemical Society. – 2003. – Vol. 150 (8). – P. 367–373.

18. Hardcastle Franklin D., Wachs Israel E. Raman spectroscopy of chromium oxide supported on Al₂O₃, TiO₂ and SiO₂: a comparative study // Journal of Molecular Catalysis. – 1988. – Vol. 46. – P. 173–186.

19. Experimental and theoretical study of structural properties and phase transitions in YAsO₄ and YCrO₄ / D. Errandonea, R. Kumar, J. López-Solano, P. Rodríguez-Hernández, A. Muñoz, M.G. Rabie, R. Sáez Puche // Physical review. B: Covering Condensed Matter and Materials Physics. – April 2011. – Vol. 83, iss. 13. DOI: 10.1103/PhysRevB.83.134109

20. Nanoscale ferromagnetic chromium oxide film from gas-phase nanocluster deposition / Y. Chen, K. Ding, L. Yang, B. Xie, F. Song, J. Wan, G. Wang, M. Han // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 92, iss.17. – P. 173112. DOI: 10.1063/1.2919077

21. The effect of deposition parameters on the structure and mechanical properties of chromium oxide coatings deposited by reactive magnetron sputtering / M. Mohammadtaheri, Q. Yang, Y. Li, J. Corona-Gomez // Coatings. – 2018. – Vol. 8. – P. 111. DOI.org/10.3390/coatings8030111

22. Raman spectroscopic analysis of the speciation of dilute chromate solutions / J.D. Ramsey, L. Xia, M.W. Kendig, R.L. McCheery // Corrosion Science. – 2001. – Vol. 43. – P. 1557–1572.

23. Structural and magnetic phase transition observed in the YCrO_{3+γ} compound / F.A. Fabian, K.O. Moura, C.C.S. Barbosa, E.B. Peixoto, J.G.S. Duque, C.T. Meneses // Journal of Alloys and Compounds. – 2017. – Vol. 702. – P. 244–248. DOI.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.378

24. High-pressure Raman scattering and structural phase transition in YCrO₄ / Y.W. Long, L.X. Yang, Y. Yu, F.Y. Li, R.C. Yu, S. Ding, Y.L. Liu, C.Q. Jin // Physical review. B: Condensed Matter and Materials Physics. – 2006. – Vol. 74. – P. 054110. DOI: 10.1103/PhysRevB.74.054110

25. Synthesis, structure, magnetism and specific heat of YCrO₄ and its zircon-to-scheelite phase transition / Y.W. Long, L.X. Yang, Y. Yu, F.Y. Li, R.C. Yu, C.Q. Jin // Physical review. B: Covering Condensed Matter and Materials Physics. – March 2007. – Vol. 75. DOI: org/10.1103/PhysRevB.75.104402

References

1. Ivanchev S.S., Dmitrenko A.V. Polimerizatsionnoe napolnenie metodom radikal'noi polimerizatsii kak sposob polucheniia kompozitsionnykh materialov [Polymerization filling by radical polymerization as a method of obtaining composite materials]. *Uspekhi khimii*, 1982, iss. 7, pp. 1178–1200.

2. Galashina N.M. Polimerizatsionnoe napolnenie kak metod polucheniia novykh kompozitsionnykh materialov (Obzor) [Polymerization filling as a method for producing new composite materials (Review)]. *Vysokomolekuliarnye soedineniia*, 1994, vol. 36, no. 4, pp. 640–650.
3. Khar'kova E.M., Mendelev D.I., Smetannikov O.V., Chinova M.S., Ivaniuk A.V., Antipov E.M. O vozmozhnosti ispol'zovaniia titan-magnievogo nanokatalizatora v protsesse polimerizatsionnogo napolneniia poliolefinov i nekotorykh svoistvakh poluchennykh kompozitov [On the possibility of using a titanium-magnesium nanocatalyst in the process of polymerization filling of polyolefins and some properties of the obtained composites]. *Vysokomolekuliarnye soedineniia. Seriya B*, 2014, vol. 56, no. 5, pp. 496–507. DOI: 10.7868/S2308113914050064
4. Ailer R. Khimiia kremnezema: Rastvorimost', polimerizatsiia, kolloidnye i poverkhnostnye svoistva: v 2 chastiah [Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloidal and Surface Properties]. Ed. V.P. Prianishnikova. Moscow: Mir, 1982, 1127 p.
5. Bertrand F., Movchan I., Samodurova M.N., Dzhigun N.S. Lazernaia naplavka kak perspektivnyi metod uprochneniia shtampovoi osnastki [Laser surfacing as a promising method for hardening tooling]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 44–52. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-44-52
6. Gusev A.A., Guseva G.V. Naplavka chistogo me-tallicheskogo poroshka impul'snym lazernym izlucheniem [Surfacing of pure metal powder with pulsed laser irradiation]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 6, pp. 254–259.
7. Grigor'iants A.G., Novichenko D.Iu., Smurov I.Iu. Lazernaia additivnaia tekhnologiia izgotovleniia pokrytii i detalei iz kompozitsionnogo materiala [Laser additive manufacturing technology for coatings and composite parts]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 2011, no. 7, pp. 38–46.
8. Porozova S.E., Starkov D.A. Vliianie dobavki dioksida titana na poristost' naplavlennogo materiala na osnove poroshka zharoprochnogo nikel'evogo splava [Influence of titanium dioxide addition on porosity of cladding material based on heat resistant nickel alloy powder]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*, 2019, no. 1, pp. 3–6.
9. Antsiferov V.H., Porozova S.E., Kul'met'eva V.B. Vliianie dobavok vodorastvorimykh polimerov na fazovyi sostav i razmery chastits dioksida tsirkoniia pri osazhdenii iz rastvorov solei [Effect of additives of water-soluble polymers on the phase composition and particle size of zirconium dioxide during deposition from salt solutions]. *Fizika i khimiia stekla*, 2012, vol. 38, no. 3, pp. 402–408.
10. Greg S., Sing K. Adsorbtsiia, udel'naia poverkhnost', poristost' [Adsorption, specific surface area, porosity]. 2nd. Moscow: Mir, 1984, 306 p.
11. Latha Kumari, Du G.H., Li W.Z., Selva R. Vennila, Saxena S.K., Wang D.Z. Syntesis, microstructure and optical characterization of zirconium oxide nanostructures. *Ceramics International*, 2009, vol. 35, iss. 6, pp. 2401–2408. DOI: 10.1016/j.ceramint.2009.02.007
12. Ghosh A., Suri A.K., Pandey M., Thomas S., Rama Mohan T.R., Rao B.T. Nanocrystalline zirconia-yttria systema Raman study. *Materials Letters*, 2006, vol. 60, iss. 9–10, pp. 1170–1173. DOI: 10.1016/j.matlet.2005.10.102
13. Liang B., Ding C., Liao H., Coddet C. Study on structural evolution of nanostructured 3 mol % yttria stabilized zirconia coatings during low temperature ageing. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, vol. 29, iss.11, pp. 2267–2273. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.01.002
14. Kozhevnikov V.N., Ivashvevskaia S.N., Kevlich V.I. Geokhimiia i ramanovskie spektry tsirkonov iz rudnykh (PGE-Au) amfibolitov massiva Travianaia Guba, Severnaia Kareliia [Geochemistry and Raman spectra of zircons from ore (PGE-Au) amphibolites of the Travyanaya Guba massif, North Karelia]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 2015, no. 7, pp. 36–53. DOI: 10/17076geo136
15. Il'inkova T.A., Barsukova E.A., Tagirov A.T. Vzaimosviaz' kharakteristik poroshkovykh materialov i mekhanicheskikh svoistv plazmennyykh teplozashchitnykh pokrytii [Relationship between the characteristics of powder materials and the mechanical properties of plasma thermal protective coatings]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 15, pp. 116–121.
16. Porozova S.E., Kul'met'eva V.B., Pozdeeva T.Iu., Shokov V.O. Rol' aglomeratov nanoporoshkov v formirovaniia struktury i svoistv keramicheskikh materialov [The role of agglomerates of nanopowders in the formation of the structure and properties of ceramic materials]. *Izvestiia vuzov. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia*, 2020, no. 4, pp. 4–13. DOI.org/10.17073/1997-308X-2020-4-4-13
17. Hurley B.L., McCheery R.L. Raman spectroscopy of monolayers formed from chromate corrosion inhibitor on copper surfaces. *Journal of The Electrochemical Society*, 2003, vol. 150 (8), pp. 367–373.
18. Hardcastle Franklin D., Wachs Israel E. Raman spectroscopy of chromium oxide supported on Al₂O₃, TiO₂ and SiO₂: a comparative study. *Journal of Molecular Catalysis*, 1988, vol. 46, pp. 173–186.
19. Errandonea D., Kumar R., López-Solano J., Rodríguez-Hernández P., Muñoz A., Rabie M.G., Sáez R. Puche Experimental and theoretical study of structural properties and phase transitions in YAsO₄ and YCrO₄. *Physical review. B: Covering Condensed Matter and Materials Physics*, 2011, vol. 83, iss. 13. DOI: 10.1103/PhysRevB.83.134109
20. Chen Y., Ding K., Yang L., Xie B., Song F., Wan J., Wang G., Han M. Nanoscale ferromagnetic chromium oxide film from gas-phase nanocluster deposition. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, iss.17, p. 173112. DOI: 10.1063/1.2919077
21. Mohammadtaheri M., Yang Q., Li Y., Corona-Gomez J. The effect of deposition parameters on the structure and mechanical properties of chromium oxide coatings deposited by reactive magnetron sputtering. *Coatings*, 2018, vol. 8, pp. 111. DOI.org/10.3390/coatings8030111
22. Ramsey J.D., Xia L., Kendig M.W., McCheery R.L. Raman spectroscopic analysis of the speciation of dilute chromate solutions. *Corrosion Science*, 2001, vol. 43, pp. 1557–1572.

23. Fabian F.A., Moura K.O., Barbosa C.C.S., Peixoto E.B., Duque J.G.S., Meneses C.T. Structural and magnetic phase transition observed in the $YCrO_3+\gamma$ compound. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 702, pp. 244–248. DOI.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.378

24. Long Y.W., Yang L.X., Yu Y., Li F.Y., Yu R.C., Ding S., Liu Y.L., Jin C.Q. High-pressure Raman scattering and structural phase transition in $YCrO_4$. *Physical review. B: Condensed Matter and Materials Physics*, 2006, vol. 74, pp. 054110. DOI: 10.1103/PhysRevB.74.054110

25. Long Y.W., Yang L.X., Yu Y., Li F.Y., Yu R.C., Jin C.Q. Synthesis, structure, magnetism and specific heat of $YCrO_4$ and its zircon-to-scheelite phase transition. *Physical review. B: Covering Condensed Matter and Materials Physics*, 2007, vol. 75. DOI: org/10.1103/PhysRevB.75.104402

Получено 20.04.2021

Опубликовано 25.06.2021

Сведения об авторах

Порозова Светлана Евгеньевна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций

Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: sw.porozova@yandex.ru.

Старков Дмитрий Александрович (Пермь, Россия) – инженер отдела разработки перспективных технологий ремонта АО «ОДК – Авиадвигатель», e-mail: starkov-da@avid.ru.

Лебедева Ксения Николаевна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: kseny1305@gmail.com.

About the authors

Svetlana E. Porozova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: sw.porozova@yandex.ru.

Dmitriy A. Starkov (Perm, Russian Federation) – Engineer, Perspective Repair Technologies Development Department, JSC "UEC – Aviadvigatel", e-mail: starkov-da@avid.ru.

Kseniya N. Lebedeva (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: kseny1305@gmail.com.