

ISSN 1561-8358 (Print)
 ISSN 2524-244X (Online)
 УДК 621.691
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-161-168>

Поступила в редакцию 07.12.2017
 Received 07.12.2017

Н. А. Руденская¹, М. В. Руденская²

¹Филиал Белорусского национального технического университета «ИПК и ПК», Минск, Беларусь
²Санкт-Петербургское открытое акционерное общество «Красный Октябрь»,
 Санкт-Петербург, Россия

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЛЕНИЯ ОКСИДНЫХ СФЕРОИДОВ В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ НА СТРУКТУРУ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Цель данной части исследований состояла в изучении структурных превращений при переходе частиц-микрокомпозитов из плазменного потока в напыленный слой с учетом измельчения сфероидов. Представлены результаты исследований импульсного деления оксидных сфероидов в плазменном потоке, гранулометрического состава микрокомпозитов двух составов: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с исходным размером частиц 40–50 мкм, 50–63, 63–71 мкм и структуры плазменных покрытий из них. Процесс импульсного деления сфероидов в плазменном потоке обнаружен во всех исследуемых композициях и наиболее интенсивен в системах: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (с исходным размером частиц 40–50 мкм и 50–63 мкм), $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (с исходным размером частиц 40–50 мкм). Изучены особенности формирования структурных фрагментов покрытий различной формы (сфероидизированных и оплавленных) и состава (полностью аморфизированных; с многослойными оболочками, в том числе аморфными). Показано, что предлагаемая технология позволяет получать керамические покрытия с аморфно-кристаллической структурой. Особенности этой структуры определяются размером и составом исходных микрокомпозитов, измельчение которых непосредственно в процессе напыления позволяет формировать в покрытиях более тонкие структуры и, соответственно, существенно изменять их эксплуатационные характеристики и качество (высокая адгезионная прочность; износостойкость в 3 раза выше, чем у покрытий из корунда; пористость – менее 1 %).

Ключевые слова: плазма, структура, покрытие, сфероиды, импульсное деление, сфероидизация, аморфизация

Для цитирования. Руденская, Н. А. Влияние импульсного деления оксидных сфероидов в плазменном потоке на структуру покрытий / Н. А. Руденская, М. В. Руденская // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 161–168. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-161-168>

N. A. Rudenskaya¹, M. V. Rudenskaya²

¹Branch of the Belarusian National Technical University “IPK and PC”, Minsk, Belarus
²“Krasny Octiabr” St.-Petersburg Open Joint-Stock Company, Saint Petersburg, Russia

INFLUENCE OF PULSED DIVISION OF OXIDE SPHEROIDS IN A PLASMA FLOW UPON THE STRUCTURE OF COATINGS

Abstract. The purpose of this part of the research was to study the structural transformations at the transition of particle-microcomposites from plasma flow into sprayed layer, taking into account grinding of spheroids. The results of investigations of the impulse fission of oxide spheroids in a plasma flow, the granulometric composition of microcomposites of two compositions: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ with an initial particle size of 40–50 μm , 50–63, 63–71 μm and the structure of plasma coatings from them are presented. The process of pulsed fission of spheroids in a plasma stream is found in all the compositions under study and is most intensive in systems of: $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ (with initial particle size of 40–50 μm and 50–63 μm), $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (with initial particle size 40–50 μm). The features of the formation of structural fragments of coatings of various shapes (spheroidized and melted) and composition (completely amorphous, with multilayer shells, including amorphous ones) are studied. It is shown that the proposed technology makes it possible to obtain ceramic coatings with amorphous-crystalline structure, which features are determined by size and composition of initial microcomposites grinding of them directly in the sputtering process allows formation of finer structures in the coatings and, accordingly, significantly changing their performance characteristics and quality (adhesion strength, wear resistance is 3 times higher than that of corundum coatings, porosity is less than 1 %).

Keywords: plasma, structure, coating, spheroids, pulse division, spheroidization, amorphization

For citation. Rudenskaya N. A., Rudenskaya M. V. Influence of pulsed division of oxide spheroids in a plasma flow upon the structure of coatings. *Vestsi Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 161–168 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-2-161-168>

Введение. Керамические материалы, содержащие оксиды титана, кремния, алюминия, циркония, находят широкое применение в практике газотермического напыления [1–5].

Процесс формирования структуры плазменных покрытий определяется многими параметрами, одним из которых является размер частиц напыляемых порошков. Попадая в поток плазмы, частицы оплавляются или расплавляются, сфероидизируются, измельчаются. И эти особенности, как правило, скрыты от исследователей. Ранее одним из авторов данной статьи с сотрудниками уже описывалось явление импульсного деления сфероидов в плазменном потоке, позволяющее совместить диспергирование частиц с их напылением [6]. Целью данной части исследований состояла в изучении изменения фракционного состава оксидных порошков $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ дисперсностью 40–50 мкм, 50–63, 63–71 мкм при обработке их в плазменном потоке и влиянии этого процесса на структуру плазменных покрытий из данных композиций.

Экспериментальная часть. Материалами для исследований послужили конгломерированные в потоке ионизированного газа порошки различной дисперсности из оксидов $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$, $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ и плазменные покрытия из этих микрокомпозитов. Плазменную обработку микрокомпозитов при естественном их охлаждении и с ускоренным охлаждением (при распылении в воду) проводили на установке УПС-1 конструкции Института металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН с секционированным генератором. Покрытия наносили на стальные образцы (Ст. 3) на установке ВБ-15, оснащенной плазмотроном, работающим на смеси воздух – природный газ. Перед нанесением покрытий поверхность образцов тщательно обезжиривали и подвергали дробеструйной обработке. Затем наносили подслои из Ni–Al или Ni–Cr толщиной 40–50 мкм, а затем – основной слой толщиной 1 мм. Микроструктуру покрытий изучали металлографическим (Neophot-21) и микрорентгеноспектральным (LEO 1455 VP) методами.

При обработке в плазменном потоке частицы приобретают сферическую форму. Вслед за сфероидизацией реализуется процесс импульсного деления сфероидов. Сущность этого процесса заключается в периодическом выделении из базовой частицы, прошедшей стадию сфероидизации в высокотемпературной зоне плазменного потока, за счет конвективного движения расплавленной массы, более дисперсных сфероидов [6]. При этом на одном полюсе базовой частицы образуется воронка, а на противоположном полюсе появляется дочерний сфероид

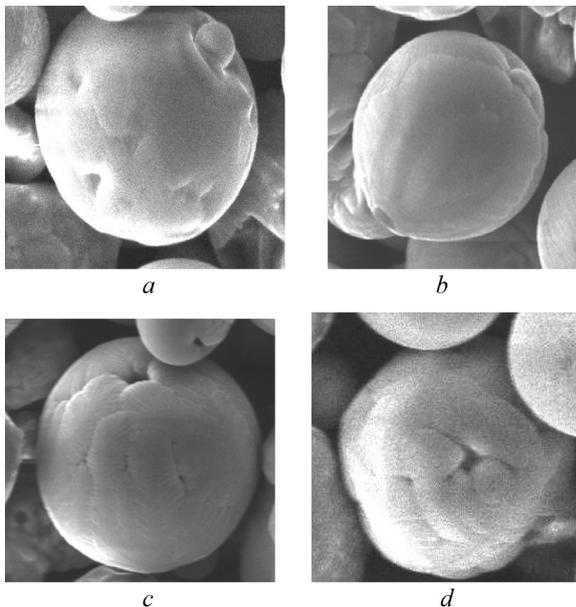


Рис. 1. Импульсное деление сфероидов с образованием на одном полюсе керамической частицы дочернего сфероида (a, b), а на другом полюсе – воронки (c, d)

Fig. 1. Pulsed fission of spheroids with formation of a ceramic particle of a daughter spheroid (a, b) at one pole, and funnels at the other pole (c, d)

(рис. 1). Гранулометрический состав порошков, обработанных в плазме, существенно изменяется: появляется значительная доля ультрадисперсной составляющей. Если реализовать процесс транспортировки исходных ультрадисперсных частиц в плазменный поток на практике с гарантированием высокого качества покрытий чрезвычайно сложно, то в предлагаемом технологическом варианте диспергированный материал с большим коэффициентом использования осаждается на поверхность детали.

Ранее показано (Патент РФ № 2191217 «Износостойкое покрытие»), что существует возможность диспергирования частиц керамики и металлокерамики размером менее 500 мкм. Степень диспергирования составляет 37 % для частиц фракции 250–500 мкм и до 90 % в случае использования исходных порошков фракции 40–100 мкм. Выход ультраразмерных частиц для средних фракций составляет до 68 %.

Для исследований изменения фракционного состава порошков в данной работе были выбраны микрокомпозиты дисперсностью 40–50 мкм, 50–63, 63–71 мкм двух составов $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ и $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$.

Исходные порошки тщательно рассеивали для получения узких фракций 40–50 мкм, 50–63 и 63–71 мкм. Такие фракции выбраны в соответствии с предыдущими исследованиями, так как из микрокомпозитов именно этих фракций формируются в плазменном потоке качественные покрытия.

Обработанные в плазменном потоке порошки, распыленные в воду, подвергали просушиванию в печи при температуре 150–200 °С в течение 5 ч. Далее с помощью оптического микроскопа изучали гранулометрический состав порошков в 15–20 полях каждого образца. При этом оценивали количество частиц размером менее 5 мкм, 5–20, 20–30, 30–40, 50–60, 60–70 мкм. Результаты исследований гранулометрического состава порошков представлены на рис. 2. Сравнительный анализ гистограмм распределения частиц по размерам свидетельствует о том, что с введением в состав композиции корунда количество частиц ультрадисперсных и фракции 1–5 мкм уменьшается на 21, 16 и 13 % соответственно для шести видов гистограмм. Для случая исходной фракции 40–50 мкм характер гистограммы изменяется незначительно: наблюдается ее сдвиг в сторону более крупных фракций на один интервал. И в конечном продукте появляются частицы дисперсностью 30–40 мкм. Аналогичное изменение фракционного состава наблюдается в случае использования исходной фракции 50–60 мкм: гистограмма сдвинута на интервал 40–55 мкм.

Совершенно иной характер распределения частиц по размерам получен после плазменной обработки исходной фракции 63–71 мкм с введением в композицию корунда: отмечается не только сдвиг гистограммы в сторону более крупных размеров частиц, но и увеличение их количества с 11% (для интервала 20–40 мкм) до 14 и 21 % (для интервалов соответственно 30–50 и 50–65 мкм).

Из приведенных на рис. 2 результатов следует, что процесс импульсного деления сфероидов в плазменном потоке наблюдается во всех исследуемых композициях и наиболее интенсивно для систем $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2$ (1, 2), $\text{SiO}_2\text{--TiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ (1).

Металлографические и микрорентгеноспектральные исследования показали, что по структуре покрытия всех составов представляют собой слоистые композиты: в материале матрицы равномерно распределены включения различной формы. Пористость полученных покрытий составляет менее 1 %. Между включениями и матричным материалом обнаружены оболочки

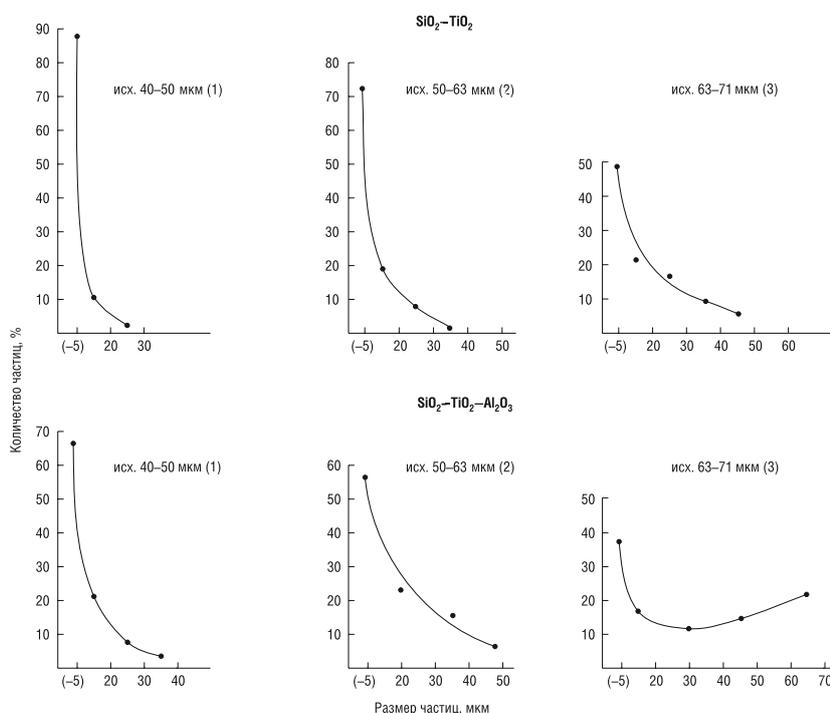


Рис. 2. Гистограммы распределения частиц по размерам

Fig. 2. Histograms of the particle size distribution

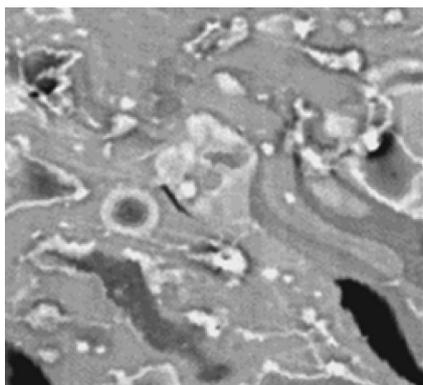


Рис. 3. Микроструктура плазменного покрытия $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (размеры включений показаны в таблице)

Fig. 3. Microstructure of the $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ plasma coating (the dimensions of the inclusions are shown in the table)

толщиной до 5,4 мкм (рис. 3), отличающиеся по цвету от материалов матрицы покрытия и ядер включений. Толщина оболочек на частицах включений определяется их размером и составом. Такие необычные структурные особенности покрытий явились основой для проведения сравнительных исследований различных составов материалов.

Комплексное изучение напыленных слоев с помощью оптической микроскопии и рентгенофазового анализа позволили выявить наличие аморфных фаз в рассматриваемых образцах, однако разделить визуально кристаллические и аморфные фазы на данном уровне исследований достаточно проблематично. Чтобы провести предварительную оценку состояния фаз в напыленных слоях, их формировали в виде монослоев, затем исследовали их микроструктуру в сравнении с микроструктурой исходных микрокомпозитов и микрокомпозитов, обработанных в плазменном потоке. Идентифицировали фазы по цвету, поскольку ранее при изучении плазменных микрокомпозитов было установлено [3–5], что

кристаллической структурой характеризуются темные фазы, аморфизированные же имеют светлые оттенки. Следует отметить еще одну особенность микроструктуры монослоев: фазы, в состав которых входит Al_2O_3 , имеют светлые оттенки и в то же время они склонны к аморфизации. Этот факт еще более осложняет изучение таких составов напыленных слоев. Поэтому дальнейшие исследования проводили сначала на композициях $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, а затем в эту систему вводили Al_2O_3 . На рис. 3 представлена микроструктура керамического покрытия $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Анализ 20–30 полей микроструктуры таких слоев с одновременной идентификацией фаз по цветовой гамме для каждого вида включений позволил выделить включения по составу двух типов (таблица): композиционные (1, 2, 4, 5) и однородные (3); по форме следующих типов: сфероидизированные (с ровной и рельефной поверхностями, 1, 2), овальные (3, 4) и деформированные (5). Однородные включения неправильной формы – это фазы белого цвета размером преимущественно менее 5 мкм (3).

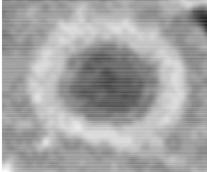
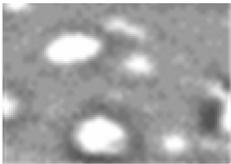
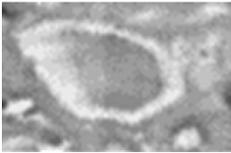
Композиционные включения характеризуются сложной структурой. Для более полного анализа необходимо разделить микроструктуру композиционных включений на две зоны: ядро и оболочку белого цвета. Оболочки имеют равномерную толщину на сфероидизированных включениях с ровной поверхностью. На сфероидизированных включениях с рельефной поверхностью такие оболочки характеризуются эпизодической несплошностью при равномерной толщине на основной протяженности. Включения овальные и неправильной формы отличаются существенной неравномерностью толщины оболочки белого цвета.

Исследования микроструктуры ядер (фаз темного цвета) композиционных включений свидетельствуют о том, что они состоят из центральной и многослойной зон (с чередованием фаз различных оттенков), последняя расположена в сторону периферии включений (между центральной зоной и внешней оболочкой белого цвета).

Размер включений в основном не соответствует размеру исходных микрокомпозитов, что вполне объяснимо механизмом формирования монослоя, кроме того, как показали исследования, микрокомпозиты выбранных фракций наиболее подвержены импульсному делению в плазме.

Несмотря на различную форму включений, которая отражает степень их проплавления, все неоднородные включения имеют в своей структуре белые оболочки. Локальный микрорентгеноспектральный анализ не позволяет определить состав этих оболочек из-за их малых толщин. Тем не менее результаты идентификации фазового состава включений в покрытиях и микрокомпозитов, обработанных в плазменном потоке с последующим охлаждением в воде, позволяют утверждать, что оболочки на включениях характеризуются аморфной структурой. Подтверждением этому служат результаты исследований микроструктуры слоевых композитов из микрокомпозитов крупных фракций: в этих случаях на включениях в покрытиях аналогичных оболочек обнаружено незначительное количество.

Результаты статистического анализа вида включений в покрытиях SiO₂-TiO₂
Results of statistical analysis of the type of inclusions in SiO₂-TiO₂ coatings

Форма включения	Характеристика включения			
	количество включений при исходной фракции порошка 50–63 мкм		количество включений при исходной фракции порошка 63–71 мкм	
	шт.	%	шт.	%
1. Включение сфероидизированное с ровной поверхностью (20 мкм) 	349	26	310	18
2. Включение сфероидизированное с рельефной поверхностью (55 мкм) 	228	17	362	21
3. Включения однородные (2–18 мкм) 	417	31	345	20
4. Включение овальное композиционное (23×58 мкм) 	256	19	483	28
5. Включение неправильной формы деформированное композиционное (37×76 мкм) 	94	7	224	13
Итого	1344	100	1724	100

Статистическую оценку включений, отличающихся по форме, проводили на пяти видах, указанных выше. В целом идентифицировали 5723 включения, сведения о 3068 из них приведены в таблице. Сравнительный анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при одинаковых режимах напыления микрокомпозитов двух фракций общее количество несфероидизированных включений составляет 26 и 41 % соответственно для фракций 50–63 и 63–71 мкм. То есть с увеличением размера исходных частиц эффективность сфероидизации уменьшилась на 15 %. Общее количество сфероидизированных включений (с ровной и рельефной поверхно-

стями) изменилось незначительно (уменьшилось на 4 %) и составило 43 и 39 % соответственно для этих фракций. Однако количество ультрадисперсных включений сократилось на 11 %. Как уже отмечалось, ультрадисперсные включения формируются в процессе импульсного деления сфероидов, и такое деление микрокомпозитов фракции 50–63 мкм происходит более интенсивно, чем микрокомпозитов фракции 63–71 мкм.

Здесь уместно провести сравнительный анализ всех видов включений. Если учесть, что однородные включения представляют собой ультрадисперсные фазы, то независимо от формы их следует отнести к группе сфероидизированных включений (как продукты процесса импульсного деления). Тогда для фракции 50–63 мкм общее количество сфероидизированных включений составляет 74 %, что в 2,8 раза превышает количество несфероидизированных включений в слоевом композите. Для фракции 63–71 мкм эти показатели составляют 59 % и 1,4 раза соответственно.

Из приведенных результатов следует, что измельчение исходных микрокомпозитов происходит именно в процессе напыления. Сравнительные исследования дисперсных материалов и микроструктуры плазменных покрытий из них свидетельствуют о том, что измельчение исходных частиц в плазменном потоке происходит по механизму импульсного деления сфероидов в плазменном потоке.

Измельчение исходных частиц порошка непосредственно в процессе напыления позволяет формировать в покрытиях более тонкие структуры и, соответственно, существенно изменять их эксплуатационные характеристики и качество (высокая адгезионная прочность; износостойкость в 3 раза выше, чем у покрытий из корунда; пористость – менее 1 %).

Представленные результаты и литературные данные [7] позволяют объяснить особенности формирования плотной структуры покрытия из оксидной керамики и высокое качество границы раздела покрытие–сталь [3, 4]. Присутствие в керамике различных оксидов и аморфных включений значительно облегчает процесс образования прочных связей на границе керамика–металл в сравнении с чистой керамикой. И чем больше степень аморфизации керамики, тем большей скоростью ползучести она характеризуется. Немаловажную роль играет и состав аморфной фазы. Так, материалы, содержащие кремнезем и оксид алюминия, легко соединяются со многими металлами [7]. Если учесть, что в составе исследуемых покрытий оксиды SiO_2 и Al_2O_3 присутствуют и в матричном материале, и в двух группах алюмосиликатных включений [3], то следует ожидать доминирующего влияния SiO_2 и Al_2O_3 на состав и структуру покрытий. Кроме того известно [2], что растворение оксида алюминия в аморфной фазе приводит к возрастанию степени аморфизации керамики. Так влияет состав исходных микрокомпозитов на аморфизацию покрытий.

Следующий определяющий фактор – это размер микрокомпозитов и, соответственно, степень их сфероидизации в плазменном потоке, а следовательно, и аморфизации.

Ранее показано (Патент РФ № 2191217 «Износостойкое покрытие»), что частицы – оксидные микрокомпозиты дисперсностью менее 50 мкм можно полностью перевести в аморфное состояние, если обеспечить условия быстрого их охлаждения, поскольку такие частицы характеризуются степенью сфероидизации 95–97 %. При формировании покрытий условия охлаждения монослоев несколько иные. Металлографический анализ покрытий свидетельствует об образовании оболочек белого цвета на включениях в составе покрытий. Толщина этих оболочек растет с уменьшением размера включений. Оболочки максимальной толщины зафиксированы именно на включениях сферической формы. По аналогии с дисперсными сфероидизированными частицами (менее 50 мкм), которые при определенных условиях переходят в аморфное состояние, можно утверждать, что обнаруженные в напыленных слоях оболочковые фазы также находятся в аморфном состоянии. То есть появление оболочек на включениях в покрытиях свидетельствует о процессе аморфизации исходных микрокомпозитов. Учитывая эти результаты и данные таблицы, необходимо отметить, что размер исходных микрокомпозитов существенно влияет на структуру напыленных слоев.

Таким образом, разработанная технология позволяет получать керамические покрытия с аморфно-кристаллической структурой, особенности которой определяются размером и составом исходных микрокомпозитов.

Выводы. Изучен процесс импульсного деления сфероидов в плазменном потоке на оксидных микрокомпозитах $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$, $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ с исходным размером 40–50, 50–63, 63–71 мкм, установлены зависимости гранулометрического состава этих материалов. Показано влияние Al_2O_3 на выход частиц размером менее 5 мкм.

Сравнительный анализ структуры и размера исходных измельченных в плазменном потоке порошков и структуры покрытий из исходных порошков позволяет утверждать, что измельчение частиц происходит в процессе их напыления и именно по механизму импульсного деления сфероидов.

Установлено существенное влияние процесса импульсного деления сфероидов на размер включений в монослоях: измельчение структуры за счет образования более дисперсных сфероидов, которые подвержены полной аморфизации; формирование многослойных оболочек, в том числе и аморфных, на сфероидизированных и оплавленных частицах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования Республики Беларусь по заданию 5.1.08 (программа «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии»).

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Belarus on assignment 5.01.08 (Program “High energy, nuclear and radiation technologies”).

Список использованных источников

1. Демиденко, Л. М. Высоко-огнеупорные композиционные покрытия / Л. М. Демиденко. – М.: Metallurgija, 1979. – 216 с.
2. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1987. – 544 с.
3. Износостойкие покрытия с аморфно-кристаллической структурой / Н. А. Руденская [и др.] // Пленки и покрытия-2001: тр. 6-й Междунар. конф., 3–5 апр. 2001, Санкт-Петербург. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – С. 371–373.
4. Новые плазменные керамические покрытия / Н. А. Руденская [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2013. – Т. 448, № 2. – С. 180–184. <https://doi.org/10.7868/S0869565213080148>
5. Руденская, Н. А. Полидисперсные микрокомпозиаты на основе тугоплавких соединений – новые материалы для газотермических покрытий / Н. А. Руденская, Г. П. Швейкин // Докл. Акад. наук. – 2007. – Т. 416, № 2. – С. 222–225.
6. Импульсное деление плазменных сфероидов / Н. А. Руденская [и др.] // Докл. Акад. наук. – 2009. – Т. 429, № 1. – С. 76–78.
7. О механизме образования соединения при сварке в твердом состоянии керамики из окиси алюминия с ниобием / Э. С. Каракозов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1968. – № 3. – С. 123–129.

References

1. Demidenko L. M. *Highly-fire-resistant composite coatings*. Moscow, Metallurgija Publ., 1979. 216 p. (in Russian).
2. Borisov Yu. S., Harlamov Yu. A., Sidorenko S. L., Ardatovskaya E. N. *Thermal spray coatings of powder materials*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987. 544 p. (in Russian).
3. Rudenskaja N. A., Shveikin G. P., Kopysov V. A., Grigorov I. G. Wear-resistant coating with amorphous-crystalline structure. *Plenki i pokrytiya-2001: Trudy 6-i Mezhdunarodnoi konf., 3–5 aprelya, 2001, Sankt-Peterburg* [Films and coatings-2001: Proceedings of the 6th International Conference, April 3–5, 2001, St. Petersburg]. Saint-Petersburg, 2001, pp. 371–373 (in Russian).
4. Rudenskaya N. A., Shveikin G. P., Sokolova N. V., Rudenskaya M. V., Novoselov A. V. New plasma ceramic coating. *Doklady Chemistry*, 2013, vol. 449, no. 1, pp. 107–110. <https://doi.org/10.1134/s0012500813030063>
5. Rudenskaya N. A., Shveikin G. P. Polydisperse microcomposites on the basis of refractory compounds – new materials for thermal spray coatings. *Doklady Chemistry*, 2007, vol. 416, no. 1, pp. 230–233. <https://doi.org/10.1134/s001250080709008x>
6. Rudenskaya N. A., Shveikin G. P., Sokolova N. V., Rudenskaya M. V. Pulse the division of plasma spheroids. *Doklady Chemistry*, 2009, vol. 429, no. 1, pp. 294–296. <https://doi.org/10.1134/s001250080911010x>
7. Karakozov Ye. S., Kotelkin A. S., Matveev G. M., Merkulov V. A., Shorshorov M. H. About the mechanism of formation of the weld in the solid state ceramic of aluminum oxide with niobium. *Fizika i himiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1968, no. 3, pp. 123–129 (in Russian).

Информация об авторах

Руденская Наталья Александровна – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Филиал Белорусского национального технического университета «ИПКиПК» (Партизанский пр., 77, 220107, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rugraf2000@mail.ru

Руденская Мария Владимировна – инженер, Санкт-Петербургское открытое акционерное общество «Красный Октябрь» (ул. Политехническая, 13–15, 194100, Санкт-Петербург, Российская Федерация). E-mail: rudenskaya 90@mail.ru

Information about the authors

Natalia A. Rudenskaya – D. Sc. (Engineer), Chief Scientific Officer, Branch of the Belarusian National Technical University “IPK and PC” (77, Partizansky Ave., 220107, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rugraf2000@mail.ru

Maria V. Rudenskaya – Engineer, “Krasny Octiabr” St.-Petersburg Open Joint-Stock Company (13–15, Polytechnicheskaya Str., Saint-Petersburg, 194100, Russian Federation). E-mail: rudenskaya 90@mail.ru