Литература

1. *Review* on the EFDA programme on tungsten materials technology and science / M. Rieth [et al.] // J. Nucl. Mater. – 2011. – Vol. 417. – P. 463–467.

2. *Levin, Z. S.* Strong ductile bulk tungsten / Z. S. Levin, K. T. Hartwig // Mater. Sci. Eng. A. – 2017. – Vol. 707. – P. 602–611.

3. *SHS Synthesis*, SPS Densification and Mechanical Properties of Nanometric Tungsten / S. Dine [et al.] // Metals, 2021. – Vol. 11. – № 2. – 252 p. DOI: 10.3390/met11020252.

4. *Долматов, В. Ю.* Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение / В. Ю. Долматов. – СПб: НПО «Профессионал», 2011. – 536 с.

5. *Жарченкова, М. И.* Исследование физико-механических свойств наноструктурированного вольфрама, модифицированного углеродными нанокластерами / М. И. Жарченкова, С. А. Перфилов, Р. Л. Ломакин // Химия и химическая технология, 2014. – Т. 57, вып. 5. – С. 74–76.

6. *Dense* tungsten carbide bulks by self-densification reaction sintering of nanodiamond with tungsten at 1700 °C / P. Zhang [et al.] // Ceram. Int. – 2023. – Vol. 49. – P. 9287–9297.

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF NANODIAMONDS ADDITIVE ON THE STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF A SINTERED COMPOSITE BASED ON TUNGSTEN

V. T. Senyut[1], S. A. Kovaleva[1], V. Yu. Dolmatov[2], P. A. Vityaz[1], I. E. Grigoriev[3]

[1]Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
tel./ fax: +375(17) 243-24-01, e-mail: vsenyut@tut.by
[2]SKTB "Tekhnolog" FGUP, St. Petersburg, Russia
[3] Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

In the paper the influence of a modifying additive of detonation nanodiamonds (DND) including DND doped with boron, on the structure, phase composition and microhardness of the material based on tungsten powder, sintered under conditions of high pressures up to 4.5 GPa and temperatures have been investigated. It has been established that the addition of nanodiamonds in an amount of 0.3 wt. % leads to an increase in the microhardness of the tungsten-based material by 2–4 times to 9–15.5 GPa and increases its ductility. It is shown that with an increase in sintering time of more than 15 s, a decrease in microhardness to 5.8–6.5 GPa is observed, which is then replaced by its increase to the initial level. An increase in the sintering temperature also leads to a decrease in microhardness, which may be due to the growth of tungsten grains.

УДК 544.77.022.822:661.682

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗА КЕРАМИЧЕСКИХ МИКРОПОРОШКОВ

В. В. Сидский[1], Л. В. Судник[2], В. Е. Гайшун[1], Д. Л. Коваленко[1], А. В. Семченко[1], А. А. Маевский[1], К. Д. Данильченко[1]

[1] Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь,
e-mail: sidskij@gsu.by
[2] Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, г. Минск, Беларусь

Объектом исследования являются конструкционные стеклокерамические материалы на основе керамического микропорошка сферической формы.

Цель работы – исследование влияния золь-гель метода и распылительного пиролиза на формирование керамических микропорошков сферической формы.

Описан метод синтеза сферических частиц оксидов металлов с использованием золь-гель метода и распылительного пиролиза. Описываются преимущества метода, включая низкие затраты и возможность использования доступных предшественников металлов. Процесс также представляет интерес для исследования разнообразных наноструктур оксидов металлов сферической формы, с акцентом на их уникальные свойства и потенциальное применение в различных областях.

В зависимости от применения ключевыми характеристиками наноматериалов являются их химический состав и структурные свойства, такие как размер, морфология, кристалличность и кристаллография. Следовательно, метод синтеза должен целенаправленно обеспечивать не-

обходимые свойства частиц в значительных количествах. После производства наночастиц обычно необходимо достичь дисперсии, сохраняющей свойства материала с высоким качеством и однородностью. Стабильные дисперсии в идеале достигаются без использования диспергаторов, однако это представляет собой сложную задачу из-за склонности наночастиц к быстрой агломерации. Поэтому крайне важно полностью понимать механизмы, регулирующие стабильность дисперсий.

Синтез наночастиц оксидов металлов методом золь-гель основан на гидролизе и конденсации/дегидратации алкоксида металла M(OR)*n*, где M представляет собой металл, O – кислород, R – органическая группа, а *n* –количество повторяющихся единиц. Алкоксиды металлов нерастворимы в воде, поэтому гидролиз обычно проводится в спиртовом растворителе. Кинетика реакций гидролиза и конденсации в основном определяется соотношением воды и алкоксида (R). В целом, значения R больше 3 подходят для формирования оптоволокна и образования тонких пленок, тогда как значения R меньше 3 приводят к образованию частиц порошка.

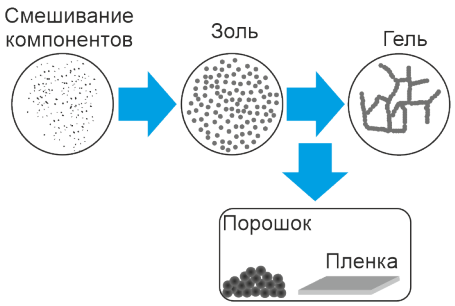

Рис. 1. Изображение процесса золь-гель синтеза

Следовательно, размер, распределение и морфология поверхности оксидных наночастиц зависят от их размера. Наиболее распространенными процессами, используемыми для создания наночастиц, являются применение золь-гель метода совместно со спрей-пиролизом (распылением на стадии золя). В случае пиролиза золь распыляется в виде тонкого тумана через капилляр в пламя. Затем образуются маленькие капельки, в то время как растворитель испаряется внутри пламени.

Превращение соли в оксид металла происходит при реакции пиролиза, и атомы оксидов металлов агрегируются в наночастицы, которые затем собираются на подложке [1]. На рис. 2 можно рассмотреть схему синтеза газопламенного пиролиза, которую можно использовать для создания наночастиц оксидов металлов.

Метод спрей-пиролиза обладает двумя основными преимуществами для синтеза мелких частиц. Во-первых, материалы смешиваются в растворе, что позволяет им начать взаимодействие на атомном уровне, обеспечивая однородное смешивание. Во-вторых, для образования кристаллических частиц требуется только температура спекания. Это позволяет получать частицы размером обычно в диапазоне от 0,5 до 500 мкм [2]. Этот метод также способствует созданию наночастиц с высокой удельной поверхностью при низких затратах на производство, однако он имеет ограничение в плане механической стабильности [1]. Для контроля морфологии также необходимо регулировать концентрацию прекурсора, время пребывания и температуру вблизи пламени [3].

Этот метод также позволяет исследовать широкий спектр наноструктурированных оксидов металлов. Например, Триколи, Уоллес и их коллеги использовали этот метод для получения наночастиц ZnO [1]. Также авторы [4] синтезировали наночастицы TiO_2, легированные Nb. Многие другие исследователи сообщали о получении наноструктур оксидов различных металлов, таких как Al_2O_3, Fe_2O_3, V_2O_5, SnO_2, ZrO_2, Mn_2O_3 или WO_3 [5].

Еще одним значительным преимуществом данного метода синтеза является возможность использования доступных и недорогих предшественников металлов. Эти предшественники могут быть комбинированы в процессе синтеза, что открывает путь к бесконечным комбинациям ионов металлов и стехиометрических соотношений. Это позволяет получать сложные и смешанные оксиды [3]. Исследования, проведенные авторами [6–7], включают в себя синтез композитов WO_3/TiO_2 и WO_3/ZnO соответственно, где использовался пиролизный синтез пламенным напылением.

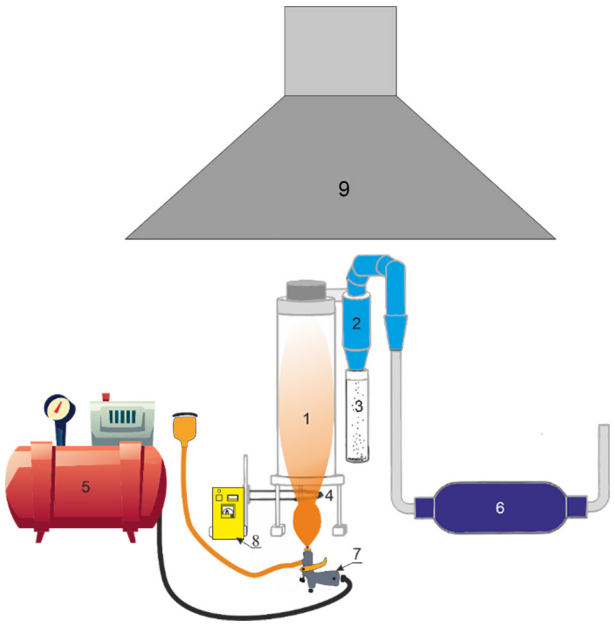

Рис. 2. Схема установки для получения микросферических порошков: *1* – кварцевая труба; *2* – улавливатель-циклон; *3* – емкость для накопления порошка сферической формы; *4* – спираль нагрева; *5* – компрессор распылителя; *6* – компрессор улавливателя; *7* – пистолет распылителя; *8* – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); *9* – вытяжка

Разработанный в Гомельском государственном университете имени Ф. Скорины метод позволяет производить пустотелые микросферы в широком диапазоне размеров: от 2 мкм до 200 мкм. Эти микросферы обладают рядом уникальных свойств, таких как легкость, низкая теплопроводность, высокая термостойкость, химическая и биологическая инертность, а также физическая и химическая стабильность. Благодаря этим характеристикам пустотелые микросферы могут успешно использоваться в качестве наполнителей для различных композиционных материалов, в том числе в машиностроении, химической промышленности, строительстве и других областях.

Процесс получения микросферных порошков на основе оксидов кремния, алюминия, титана и других элементов с использованием золь-гель метода и распылительного пиролиза включает следующие этапы:

1. Приготовление золя требуемого состава.
2. Распыление золя на нагревательную спираль установки.
3. Удаление жидкой фазы и воспламенение капель золя.
4. Улавливание и извлечение сформированных частиц.

Процесс начинается с направления золя на предварительно нагретую спираль с использованием распылителя. Температура спирали поднимается до красного каления. При попадании в область раскаленной спирали спирт, содержащийся в каплях золя, воспламеняется и полностью сгорает. Этот процесс приводит к образованию гель-крупки.

Чтобы предотвратить удаление образовавшейся гель-крупки на большие расстояния, пространство вокруг расположения спирали и над ней ограждается кварцевой трубой с внутренним диаметром около 150 мм. Температура в центре трубы повышается до нескольких сотен градусов, достигая 700 °С, что способствует удалению влаги из гель-крупки. Частицы, которые переносятся тепловым потоком вверх, улавливаются с использованием циклона, установленного над трубой (рис. 2).

Методом распылительного пиролиза из приготовленных золей были получены порошки, имеющие форму, близкую к сферической. Образовавшиеся частицы приобретают форму шариков, внутри полых, размер которых определяется диаметром диффузора распылителя (рис. 3). На завершающем этапе процесса проводится спекание этих частиц при температуре 1100–1200 °С на воздухе до достижения стеклообразного состояния.

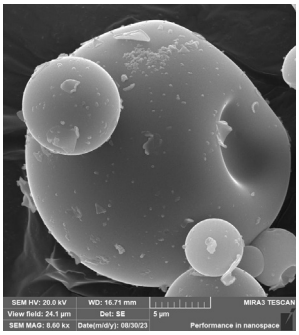

Рис. 3. Морфология поверхности микросферических порошков на основе диоксида кремния

Итак, метод синтеза сферических частиц с использованием золь-гель метода и распылительного пиролиза представляет собой эффективный способ получения наноструктурированных оксидов металлов с уникальными свойствами. Преимущества включают однородное смешивание материалов в растворе, низкие затраты на производство, а также возможность использования доступных и дешевых предшественников металлов. Метод разработанный в Гомельском государственном университете, позволяет производить пустотелые микросферы разных размеров, от 2 до 200 мкм. Эти микросферы обладают такими свойствами, как легкость, низкая тепло- и электропроводность, высокая термостойкость, химическая и биологическая инертность, а также физическая и химическая стабильность. Благодаря этим свойствам полые микросферы могут быть использованы в качестве наполнителей для композиционных материалов.

Литература

1. *Ultra-rapid* synthesis of highly porous and robust hierarchical ZnO films for dye sensitized solar cells / A. Tricoli [et al.] // Solar Energy. – 2016. – Vol. 136. – P. 553–559.

2. *Kruis, F. E.* Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications – a review / F. E. Kruis, H. Fissan, A. Peled // J. Aerosol Sci. – 1998. – Vol. 29, № 5–6. – P. 511–535.

3. *Athanassiou, E. K.* Chemical aerosol engineering as a novel tool for material science: from oxides to salt and metal nanoparticles / E. K. Athanassiou, R. N. Grass, W. J. Stark // Aerosol Sci. Technol. – 2010. – Vol. 44, № 2. – P. 161–172.

4. *Flame-made* Nb-doped TiO_2 ethanol and acetone sensors / S. Phanichphant [et al.] // Sensors. – 2011. – Vol. 11, № 1. – P. 472–484.

5. *Nano-α-*Al_2O_3 by liquid-feed flame spray pyrolysis / R. M. Laine [et al.] // Nature Materials. – 2006. – Vol. 5, № 9. – P. 710–712.

6. *Characterization* of WO_3 / ZnO nanocomposites synthesized by flame spray pyrolysis / C. Siriwong [et al.] // AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics. – 2009. – Vol. 1151, № 1. – P. 13–16.

7. *Yoshikawa, A.* Growth of optical crystals by the micro-pulling-down method / A. Yoshikawa, V. Chani // MRS Bulletin. – 2009. – Vol. 34, № 4. – P. 266–270.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF SOL-GEL SYNTHESIS OF CERAMIC MICROPOWDERS

V. V. Sidskij[1], L. V. Sudnik[2], V. E. Gajshun[1], D. L. Kovalenko[1], A. V. Semchenko[1], A. A. Maevskij[1], K. D. Danilchenko[1]

[1]Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Belarus e-mail: sidskij@gsu.by
[2]O.V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

The object of investigation is structural glass-ceramic materials based on ceramic micropowder of spherical shape.

The aim of the work is to investigate the influence of sol-gel method and spray pyrolysis on the formation of ceramic micropowders of spherical shape.

A method for synthesizing spherical metal oxide particles using sol-gel method and spray pyrolysis is described. Method advantages are described, including low cost and the ability to utilize available metal precursors. The process is also of interest for investigating a variety of spherical metal oxide nanostructures, with emphasis on their unique properties and potential applications in various fields.

УДК 621.762.5

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ 6YSZ – Al_2O_3 – HFO_2

М. К. Скаков, А. М. Жилкашинова, Д. Д. Ерболат

Восточно-Казахстанский университет имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан, тел.: 8 (777) 683-12-11, e-mail: diaserbolat16@gmail.com

В настоящей работе приведены основные результаты по разработке технологии синтеза керамики на основе диоксида циркония. Проведено исследование влияния температурного фактора на структуру и физико-механические свойства керамического материала, спеченного из порошков диок-