

УДК 666.9-127

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-134-139

*В.В. ШЕХОВЦОВ, О.Г. ВОЛОКИТИН, Р.Е. ГАФАРОВ,  
М.А. СЕМЕНОВЫХ,*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

## **ПОЛУЧЕНИЕ МИКРОСФЕР НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ ГРУППЫ\***

Разработка новых энергоэффективных методов получения строительных материалов всегда актуальна. Одним из таких материалов является микросфера, которую можно получить с помощью энергии плазмы. Изучение физических процессов, протекающих при формировании микросфер различной плотности, позволит определить оптимальные параметры производства качественных строительных материалов. Статья посвящена технологическим особенностям получения микросфер на основе материалов алюмосиликатной группы. Исследованы режимы истечения плазменной струи и их влияние на морфологию и структуру получаемых микросфер. Установлена возможность получения микросфер с различной морфологией за счет регулирования расхода плазмообразующего газа.

**Ключевые слова:** микросферы; плазма; рентгенограмма; зола; кварцевый песок; бемит.

**Для цитирования:** Шеховцов В.В., Волокитин О.Г., Гафаров Р.Е., Семеновых М.А. Получение микросфер на основе материалов алюмосиликатной группы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 134–139.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-134-139

*V.V. SHEKHOVTSOV, O.G. VOLOKITIN, R.E. GAFAROV,  
M.A. SEMENOVYKH,*

*Tomsk State University of Architecture and Building*

## **ALUMINOSILICATE MICROSPHERE PRODUCTION**

The development of new energy-efficient methods in the production of building materials is always important. One of such materials is microspheres which can be obtained by plasma energy. A study of physical processes during the formation of microsphere density determines the optimum parameters for the production of high-quality building materials. The article is devoted to production process of microspheres based on aluminosilicates. The plasma jet modes and their effect on the morphology of generated microspheres are investigated. It is shown that microspheres with different morphology can be produced by using a plasma gas control.

**Keywords:** microspheres; plasma; X-ray diffraction pattern; ash; silica sand; boehmite.

**For citation:** Shekhovtsov V.V., Volokitin O.G., Gafarov R.E., Semenovych M.A. Poluchenie mikrosfer na osnove materialov alyumosilikatnoi gruppy [Aluminosilicate microsphere production]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 6. Pp. 134–139.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-134-139

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ в рамках научного проекта № 18-48-703004.

Сегодня микросферы широко применяются при производстве теплоизоляционных материалов, радиопрозрачных керамик и специальных видов цемента, однако разрабатываются и новые технологии их применения в различных областях промышленности. И если в строительной и огнеупорной сферах требования к качеству микросфер невысокие, то уже в медицине и авиастроении они резко возрастают [1–5]. Одним из основных требований, предъявляемых к микросферам на сегодняшний день, является термическая и кислотная стойкость. К таким материалам можно отнести высококремнеземистые и глиноземистые материалы. Температура плавления (1993/2350 К) данных материалов повышает требования к источникам тепловой энергии [6–8]. Перспективным источником нагрева-плавления тугоплавких материалов являются плазменные генераторы, позволяющие реализовывать высококонцентрированные среды со среднемассовой температурой до 10000 К [9–11]. В работе представлены результаты экспериментальных исследований в области получения микросфер на основе тугоплавких сырьевых материалов с использованием воздушно-плазменных гетерогенных потоков.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории «Электроплазменные технологии» Томского государственного архитектурно-строительного университета. Для реализации воздушно-плазменного гетерогенного потока использовался электродуговой плазмотрон [12]. Производительность электродугового плазмотрона определяется расходом плазмообразующего газа и тепловой мощностью плазменной дуги. В ходе работы произведена разработка измерительной системы теплофизических характеристик электродугового плазмотрона. Фиксация плазмообразующего газа ( $G_g$ ) осуществляется ротаметром марки LZT-06 (США), погрешность измерения составляет  $\pm 4\%$ . Сила тока ( $I$ ) и напряжение ( $U$ ) определяется цифровым вольт-амперметром марки PVA400, погрешность измерения  $\pm 1\%$ . По установленным параметрическим характеристикам методом колориметрирования определялась среднемассовая температура ( $T_g$ ) и скорость ( $u_g$ ) воздушно-плазменной струи. Оценка режимов истечения плазменной струи определяется ламинарным или турбулентным состоянием. Данное явление описывается безразмерным соотношением (число Рейнольдса)  $Re = (\rho_g u_g d_s) / \mu_g$ , где  $\rho_g$ ,  $u_g$ ,  $\mu_g$  – плотность, скорость и вязкость нагретого газа (плазма),  $d_s$  – диаметр сопла (10 мм). На рис. 1 представлены снимки воздушно-плазменной струи при различном расходе плазмообразующего газа (воздух).

В зависимости от расхода плазмообразующего газа плазменная струя может находиться в ламинарном или турбулентном состоянии. При сравнении турбулентной и ламинарной струи видно, что зона активного нагрева (ядро) у ламинарного потока в два раза длиннее. Также стоит отметить, что ламинарный поток стабилен и позволяет обеспечить интенсивную обработку вводимых в него частиц [13–15].

С целью наглядного влияния режимов истечения плазменной струи и влияния ее на морфологию получаемых микросфер произведена обработка агломерированного порошка узкой фракцией 90–100 мкм на основе зольного остатка ГРЭС. На рис. 2 представлены снимки оптической микроскопии обработанных агломерированных порошков на основе зольного остатка ГРЭС

фракцией 90–100 мкм при различных режимах расхода плазмообразующего газа 0,5–1,5 г/с.

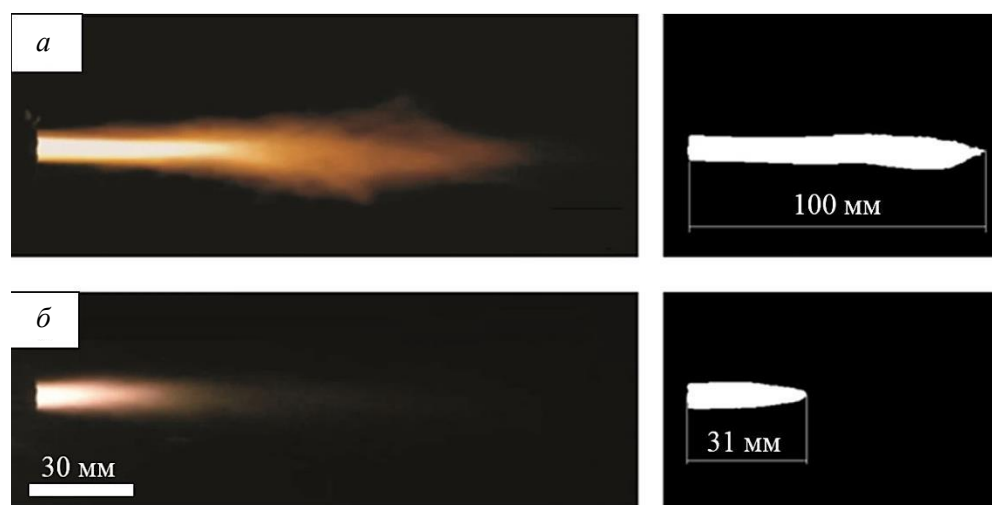


Рис. 1. Снимки формы плазменной струи при различном расходе плазмообразующего газа: *а* – ламинарное истечение плазменной струи,  $Re = 1300$ ,  $G_g = 1,0$  г/с; *б* – турбулентное истечение плазменной струи,  $Re = 2600$ ,  $G_g = 1,5$  г/с



Рис. 2. Снимки оптической микроскопии обработанного агломерированного порошка на основе зольного остатка ГРЭС в плазменной струе фракцией 90–100 мкм: *а* – плотная микросфера с отдельными газовыми включениями в поверхностном слое; *б* – полая микросфера; *в* – остеклованный агломерат

При минимальном расходе 0,5 г/с осуществляется перегрев частиц с последующим формированием плотных микросфер (диаметр  $D_{p,m} = (65 \pm 3)$  мкм, плотность  $\rho_p = 1,98$  г/см<sup>3</sup>) с отдельными газовыми включениями в поверхностном слое. При расходе 1,0 г/с осуществляется рациональный режим нагрева, способствующий образованию полых микросферы ( $D_{p,m} = (110 \pm 2)$  мкм,  $\rho_p = 0,83$  г/см<sup>3</sup>) с толщиной стенки 4–5 мкм. Увеличение расхода до 1,5 г/с приводит к остекловыванию поверхности агломерата, формируется тонкая пленка  $\leq 1$  мкм, диаметр и плотность частицы находятся при начальных условиях ( $D_{p,m} = (95 \pm 2)$  мкм,  $\rho_p = 1,36$  г/см<sup>3</sup>). Стоит отметить, что процесс структурообразования полученных микросфер плотной и полых структуры при расходе плаз-

мообразующего газа 0,5–1,0 г/с можно считать завершенным за счет осветления стекломассы, при котором осуществляется рациональное остывание гомогенизированной массы путем исключения барьерных термических напряжений.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить возможность прогнозирования относительной толщины оболочки за счет истечения плазменной струи.

В зависимости от режима истечения плазменной струи возможно получать три вида частиц: плотную, полую микросферу и агломерат с пленкой конденсированного материала на поверхности.

На следующем этапе работы планируется провести исследования структурно-фазовых состояний оболочки микросфер.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Solonenko O.P. Criterion conditions for the formation of hollow microspheres from plasma-treated agglomerated particles // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. V. 21. № 6. P. 735–746.
2. Перфилов В.А., Котляревская А.В., Канавец У.В. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства легких мелкозернистых бетонов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2016. № 43 (62). С. 93–103.
3. Navid R., Carsten K. Cenospheres: A review // *Fuel*. 2017. V. 207. № 1. P. 1–12.
4. Gulyaev P.Yu., Gulyaev I.P., Milyukova I.V., Cui H.-Z. Temperature measurements for ni-al and ti-al phase control in shs synthesis and plasma spray processes // *High Temperatures – High Pressures*. 2015. V. 44. № 2. P. 83–92.
5. Kornienko E.E., Lapushkina E.J., Kuzmin V.I. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. V. 567. № 1. P. 012010.
6. Yi Li, Xiangpeng Gao, Hongwei Wu Further Investigation into the Formation Mechanism of Ash Cenospheres from an Australian Coal-Fired Power Station // *Energy Fuels*. 2013. V. 27. № 2. P. 811–815.
7. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology // Cambridge: The Royal Society of Chemistry. 2005. 312 p.
8. Vassilev S.V., Menendez R., Diaz-Somoano M., Martinez-Tarazona M.R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 2. Characterization of ceramic cenosphere and salt concentrates // *Fuel*. 2004. V. 83. P. 585–603.
9. Донской А.В., Клубникин В.С. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Ленинград : Машиностроение, 1979. 221 с.
10. Zhukov A.S., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Gol'din V.D. Evaluation of the morphology of particles produced by plasma-chemical synthesis of ceramic powders // *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2013. V. 7 (6). P. 777–782.
11. Гуляев И.П. Обработка полых порошков в камере переменного давления // *Вестник Югорского государственного университета*. 2013. Т. 29. № 2. С. 23–30.
12. Пат. № 2664287. Устройство для получения микросфер и микрошариков из оксидных материалов / В.В. Шеховцов, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, О.Г. Волокитин, В.К. Чибирков. Оpubл. 16.08.2018, Бюл. № 23.
13. Келбалиев Г.И. Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы // *Теоретические основы химической технологии*. 2011. Т. 45. № 3. С. 264–283.
14. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. Москва : Машиностроение, 1994. 320 с.
15. Архипов В.А., Усанина А.С. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде. Томск : Изд. дом Томского гос. ун-та, 2014. 252 с.

## REFERENCES

1. Solonenko O.P. Criterion conditions for the formation of hollow microspheres from plasma-treated agglomerated particles. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. V. 21. No. 6. Pp. 735–746.
2. Perfilov V.A., Kotlyarevskaya A.V., Kanavets U.V. Vliyanie polykh steklyannykh mikrosfer na svoystva legkikh melkozernistykh betonov [The effect of hollow glass microspheres on the properties of light fine-grained concrete]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2016. No. 43 (62). Pp. 93–103. (rus)
3. Navid R., Carsten K. Cenospheres: A review. *Fuel*. 2017. V. 207. No. 1. Pp. 1–12.
4. Gulyaev P.Yu., Gulyaev I.P., Milyukova I.V., Cui H.-Z. Temperature measurements for Ni-Al and Ti-Al phase control in SHS synthesis and plasma spray processes. *High Temperatures – High Pressures*. 2015. V. 44. No. 2. Pp. 83–92.
5. Kornienko E.E., Lapushkina E.J., Kuzmin V.I. Air plasma sprayed coatings of self-fluxing powder materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. V. 567. No. 1. P. 012010.
6. Yi Li, Xiangpeng Gao, Hongwei Wu. Further investigation into the formation mechanism of ash cenospheres from an Australian coal-fired power station. *Energy Fuels*. 2013. V. 27. No. (2). Pp. 811–815.
7. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005. 312 p.
8. Vassilev S.V., Menendez R., Diaz-Somoano M., Martinez-Tarazona M.R. Phase-mineral and chemical composition of coal fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 2. Characterization of ceramic cenosphere and salt concentrates. *Fuel*. 2004. V. 83. Pp. 585–603.
9. Donskoi A.V., Klubnikin V.S. Elektroplazmennye protsessy i ustanovki v mashinostroenii [Electroplasma processes and installations in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979. 221 p. (rus)
10. Zhukov A.S., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Gol'din V.D. Evaluation of the morphology of particles produced by plasma-chemical synthesis of ceramic powders. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2013. V. 7. No. 6. Pp. 777–782.
11. Gulyaev I.P. Obrabotka polykh poroshkov v kamere peremennogo davleniya [Hollow powder processing in a variable pressure chamber]. *Vestnik Yugorskogo gos. un-ta*. 2013. V. 29. No. 2. Pp. 23–30. (rus)
12. Shekhovtsov V.V., Volokitin G.G., Skripnikova N.K., Volokitin O.G., Chibirkov V.K. Ustroystvo dlya polucheniya mikrosfer i mikrosharikov iz oksidnykh materialov [Device for producing microspheres and microballs from oxide materials]. Patent Russ. Fed. N 2664287, 2018. (rus)
13. Kelbaliev G.I. Koeffitsienty soprotivleniya tverdykh chastits, kapel' i puzyrei razlichnoi formy [Resistance coefficients of solid particles, droplets and bubbles of various shape]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*. 2011. V. 45. No. 3. Pp. 264–283. (rus)
14. Sternin L.E., Shraiber A.A. Mnogofaznye techeniya gaza s chastitsami [Multiphase gas flow with particles]. Moscow: Mashinostroenie, 1994. 320 Pp. (rus)
15. Arkhipov V.A., Usanina A.S. Dvizhenie chastits dispersnoi fazy v nesushchei srede [Particles motion of dispersed phase in a carrier medium]. Tomsk: TSU, 2014. 252 p. (rus)

## Сведения об авторах

Шеховцов Валентин Валерьевич, ассистент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, shehovcov2010@yandex.ru

Волокитин Олег Геннадьевич, докт. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, volokitin\_oleg@mail.ru

Гафаров Руслан Евгеньевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, GreexRayne@gmail.com

Семеновых Марк Андреевич, аспирант, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, markik90@gmail.com

**Authors Details**

*Valentin V. Shekhovtsov*, Assistant Lecturer, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, shehovcov2010@yandex.ru

*Oleg G. Volokitin*, DSc, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, volokitin\_oleg@mail.ru

*Ruslan E. Gafarov*, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, GreexRayne@gmail.com

*Mark A. Semenovych*, Research Assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, markik90@gmail.com