

УДК 621.926 : 678.053

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-12-19

## Получение порошков нитрида алюминия с использованием пневмоциркуляционного метода и определение их значимых характеристик

© 2016 г. В.А. Полюшко, Ю.А. Бирюков, И.В. Ивонин, А.Ю. Обьедков

Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ)

Статья поступила в редакцию 03.11.15 г., доработана 18.12.15 г., подписана в печать 21.12.15 г.

Пневмоциркуляционным методом получены различные фракции порошков алюминия и нитрида алюминия. Порошки Al имеют высокую дисперсность и минимальное содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . При переработке порошков нитрида алюминия СВС-К и СВС-Н при одинаковых режимах работы выявлено существенное отличие в морфологии частиц, обусловленное методами получения этих материалов. Для частиц AlN значение форм-фактора  $K$  в процессе переработки изменяется от 20,5 у исходного порошка до 11,8 у остатка порошка в установке. Применение пневмоциркуляционного метода в процессе получения порошков AlN определяет особенности их морфологии и электрокинетических характеристик в суспензии. Установлено влияние pH на дзета-потенциал ( $\zeta$ ) частиц AlN. Изменение величины pH порошка AlN с 3 до 8 приводит к изменению значения  $\zeta$  с +15 до –23 мВ.

**Ключевые слова:** нитрид алюминия, алюминий, порошки, фракционирование, морфология, гранулометрический состав, дзета-потенциал.

**Полюшко В.А.** – науч. сотр. инновационно-технологического научно-образовательного центра (ИТНОЦ) Томского государственного университета (ТГУ) (634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36). Тел.: (3822) 52-98-90. E-mail: polyushko@niipmm.tsu.ru.

**Бирюков Ю.А.** – директор ИТНОЦ ТГУ, зав. лабораторией аэромеханики Научно-исследовательского института прикладной математики и механики (НИИ ПММ) ТГУ. Тел.: (3822) 52-97-06. E-mail: powder@niipmm.tsu.ru.

**Ивонин И.В.** – докт. физ.-мат. наук, проф., проректор по научной работе ТГУ, зав. кафедрой физики полупроводников ТГУ. Тел.: (3822) 52-95-78. E-mail: iiv@phys.tsu.ru.

**Обьедков А.Ю.** – науч. сотр. лаборатории аэромеханики НИИ ПММ ТГУ. Тел.: (3822) 52-98-90. E-mail: powder@niipmm.tsu.ru.

**Для цитирования:** Полюшко В.А., Бирюков Ю.А., Ивонин И.В., Обьедков А.Ю. Получение порошков нитрида алюминия с использованием пневмоциркуляционного метода и определение их значимых характеристик // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 1. С. 12–19. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-12-19.

*Polyushko V.A., Biryukov Yu.A., Ivonin I.V., Obyedkov A.Yu.*

### **Production of aluminium nitride powders by the pneumatic circulation method and determination of their significant features**

A variety of powdered aluminium and aluminium nitride fractions were obtained by the pneumatic circulation method. The aluminium powders have small particle sizes and low content of  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Processing the SHS-K and SHS-N aluminium nitride powders under the same operating conditions revealed significant difference in particles morphology which depends on the methods of obtaining these materials. For AlN particles the  $K$  form-factor value changes when processing from 20,5 for the original powder to 11,8 for the powder residue in the unit. Applying the pneumatic circulation method in order to obtain AlN powders reveals their morphology features and electrokinetic characteristics in the dispersion. The effect of pH on the zeta potential ( $\zeta$ ) of the AlN particles was determined. Changing the pH value for the AlN powder from 3 to 8 leads to changing the value  $\zeta$  from +15 to –23 mV.

**Keywords:** aluminium nitride, aluminium powders, fractionating, morphology, particle size distribution, zeta potential.

**Polyushko V.A.** – researcher of Innovation-technological research and education centre (ITREC) of Tomsk State University (TSU) (634050, Russia, Tomsk, Lenin av., 36). Tel.: (3822) 52-98-90. E-mail: polyushko@niipmm.tsu.ru.

**Biryukov Yu.A.** – director of ITREC TSU, head of laboratory of aeromechanics of Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics (RIAMM) TSU. Tel.: (3822) 52-97-06. E-mail: powder@niipmm.tsu.ru.

**Ivonin I.V.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), prof., vice rector for research, head of the Department of semiconductor physics, TSU. Tel.: (3822) 52-95-78. E-mail: iiv@phys.tsu.ru.

**Obyedkov A.Yu.** – researcher of laboratory of aeromechanics of RIAMM TSU. Tel.: (3822) 52-98-90. E-mail: powder@niipmm.tsu.ru.

**Citation:** Polyushko V.A., Biryukov Yu.A., Ivonin I.V., Obyedkov A.Yu. Poluchenie poroshkov nitrída alyuminiya s ispol'zovaniem pnevmotsirkulyatsionnogo metoda i opredelenie ikh znachimyykh kharakteristik. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2016. No. 1. С. 12–19. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-1-12-19.

## Введение

Нитрид алюминия (AlN) признан весьма перспективным материалом при создании различных керамик для энергетики и микроэлектроники. Он также является одним из компонентов при получении высокотемпературной совместно обжигаемой керамики (HTCC), низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC),  $\alpha/\beta$ -сиалоновой керамики (SiAlON) [1–4].

Свойства изделий из нитрида алюминия (теплопроводность и электропроводность) определяются прежде всего характеристиками исходного порошка (химической чистотой, дисперсностью) и влиянием различных добавок [5].

Теплопроводность вещества зависит от длины свободного пробега «фононов» (тепловая упругая волна) и степени нарушения гармоничности колебаний тепловых волн во время их прохождения через вещество. То есть теплопроводность определяется структурой вещества, числом и видом атомов и ионов, рассеивающих волновые колебания. Например, существенный вклад в снижение теплопроводности вносит присутствие в составе AlN оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Данный факт обусловлен наличием оксидной пленки из гидроксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ( $2\text{Al}(\text{OH})_3$ ) у всех частиц алюминия, используемых при получении AlN методом азотирования порошков алюминия путем самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), печного и т.д.

При уменьшении размеров частиц порошка AlN возможно получение более тонких пленок сырой необожженной керамики для производства HTCC и LTCC. В процессах создания HTCC и LTCC применяются керамические суспензии [6]. Но при изготовлении суспензий из более мелких керамических порошков возникает проблема, которая состоит в том, что как пограничная площадь между частицами твердой фазы и жидким носителем, так и число частиц в данном объеме значительно возрастают. Это приводит к сильно-му физико-химическому взаимодействию между твердыми частицами в жидкой фазе. Следовательно, можно ожидать, что преимуществу от частиц меньшего размера может противодействовать необходимость перехода к сниженным объемам загрузки в суспензиях или шликерах. Здесь важную роль также играет и форма частиц, сильно влияющая на вязкость шликера.

## Материалы и методы исследований

Проведены работы по получению фракций алюминия из стандартного порошка АСД-6 с использованием пневмоциркуляционного метода [7]. Данный метод характеризуется возможностью обработки частиц ударом, скалыванием и обдиром в процессе управляемого циркуляционного движения под действием высокоскоростных газовых струй с одновременным фракционированием частиц на лопаточном роторе и во внешних сепарационных элементах [8, 9]. На рис. 1 представлена схема установки К-05 для диспергирования и классификации, на которой проводились исследования.

В пневмоциркуляционную установку периодически загружался исходный порошок АСД-6 и далее осуществлялся процесс его измельчения. Во время работы установки происходило непрерывное фракционирование порошков по размерам на двух ступенях циклонных пылеуловителей и фильтре.

Аналогичным образом достигалось разделение на фракции порошков нитрида алюминия: порошка под торговой маркой СВС-К (ТУ 88-1-200-92, г. Екатеринбург) и порошка, полученного авторами из выделенных фракций алюминия СВС-методом в реакторе СП-Р60 и обозначенного как СВС-Н. Нитрид алюминия получали в среде азота при давлении газа  $P = 4$  МПа. В состав шихты входило 70 % Al и 30 % AlN как инертного наполнителя.

Измерения полученных частиц выполняли на лазерном дифрактометре «Mastersizer-2000» (Великобритания) (в виде интегральных —  $Q(d)$  — и дифференциальных —  $F(d)$  — функций объемного распределения частиц по размерам, где  $d$  — размер частиц) и анализаторе удельной поверхности «Tristar 3000» (США).

Динамику изменения основных фаз ( $\text{Al}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) и структурных параметров полученных образцов нитрида алюминия исследовали на рентгеновском дифрактометре «Shimadzu XRD 6000» (Япония) ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение). Анализ фазового состава выполнен с использованием баз данных PCPDFWIN.

Измерение дзета-потенциала частиц нитрида алюминия проводили с помощью прибора для характеристики наночастиц «Malvern Zetasizer Nano-ZS» (Великобритания).

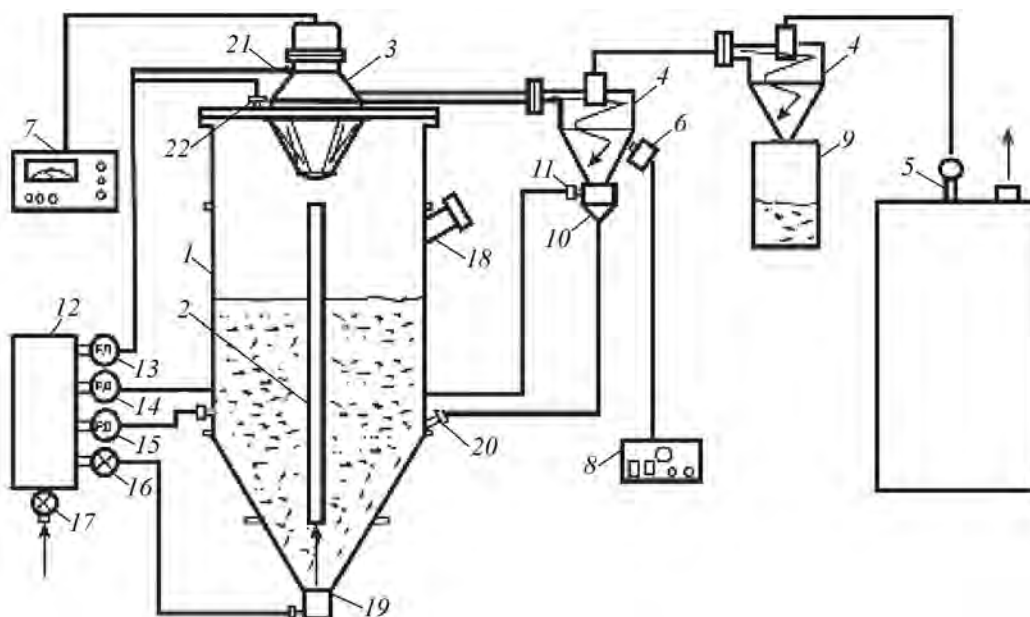


Рис. 1. Принципиальная схема пневмоциркуляционной установки типа К-05

1 – корпус; 2 – циркуляционная труба; 3 – ротационный сепаратор; 4 – циклонные сепараторы; 5 – фильтр тонкой газоочистки; 6 – встряхиватель; 7 – пульт управления; 8 – датчик импульсов; 9 – приемный бункер; 10, 11 – эжекционное устройство; 12 – ресивер; 13–17 – воздухораспределительный узел; 18 – загрузочный патрубок; 19 – рабочее сопло; 20 – патрубок возврата фракции на доизмельчение; 21, 22 – поддув газа в подшипниковый узел ротационного сепаратора

## Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлен гранулометрический состав фракций, полученных при переработке порошка алюминия АСД-6 в пневмоциркуляционной установке. По горизонтальной оси отложены размеры частиц ( $d$ ), а по вертикальной — их объемное процентное содержание (дифференциальная функция распределения частиц по размерам  $F(d)$ ). Видно, что в процессе переработки исходного порошка произошло его разделение на несколько различных фракций.

Дифференциальные функции  $F(d)$  объемного распределения частиц по размерам полученных фракций алюминия имеют узкую ширину распределения  $S_{pan} = (d_{90} - d_{10})/d_{50} \approx 1$ , где  $d_{90}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{10}$  — размеры, определяющие границу, для которой интегральное значение объемной доли частиц, имеющих меньший размер, составляет 90, 50 и 10 об.% соответственно.

В табл. 1 приведены данные по фазовому составу полученных образцов. Видно, что образец Ф содержит наибольшее количество фазы  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , а образец Ц2 — максимальную долю Al.

Как видно из представленной на рис. 3, а фотографии, фракция Ф содержит большое количество частиц несферической (пластинки и чешуйки) формы. В то же время во фракции Ц2 частицы с

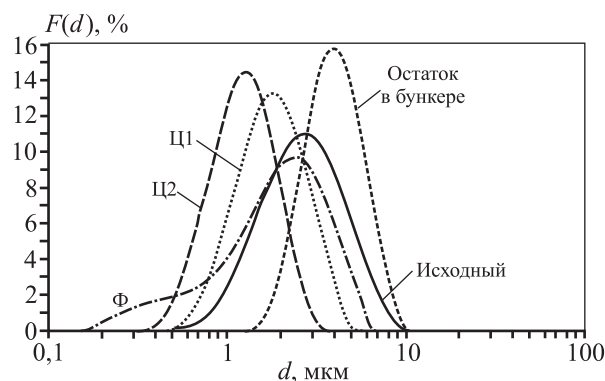


Рис. 2. Гранулометрический состав различных фракций после диспергирования и классификации исходного порошка

Ц1 – фракция из циклонного сепаратора 1-й ступени  
Ц2 – фракция из циклонного сепаратора 2-й ступени  
Ф – фракция из фильтра (3-я ступень)

Таблица 1. Содержание фаз Al и  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$  на разных ступенях фракционирования

Ступень фракционирования	Образец	Обнаруженные фазы	Содержание фаз, об. %
1	Ц1	Al	96
		$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	4
2	Ц2	Al	98
		$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	2
3	Ф	Al	70
		$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	30

несферической формой практически отсутствуют (рис. 3, б).

Высокое содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  во фракции Ф (см. табл. 1) связано со следующими причинами:

— уменьшение размеров частиц алюминия данной фракции при практически постоянной толщине поверхностной оксидной пленки приводит к увеличению объемной доли гидроксида алюминия;

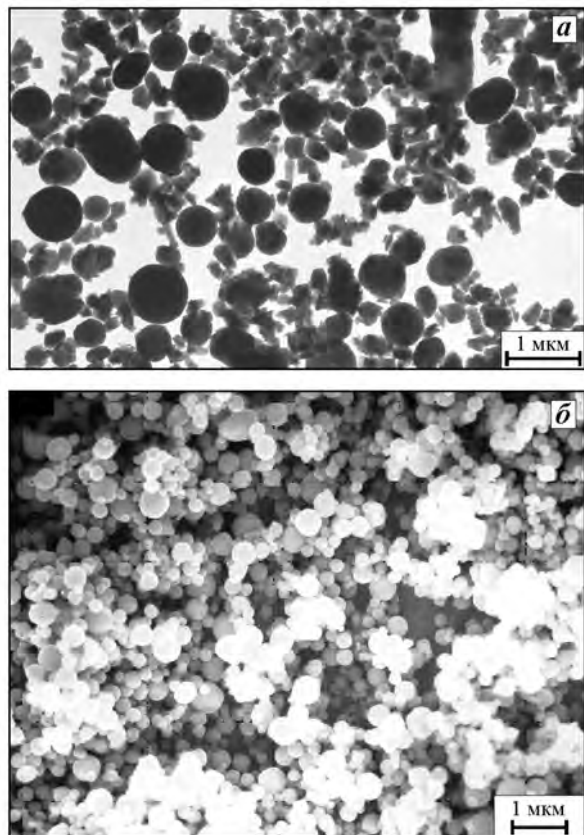


Рис. 3. Фотографии фракций алюминия Ф (а) и Ц2 (б), полученные с помощью просвечивающего (а) и сканирующего (б) электронных микроскопов ( $\times 10000$ )

— присутствующие во фракции Ф частицы в виде пластинок и чешуек образовались в результате обдира поверхностной оксидной пленки частиц алюминия при их многократных интенсивных соударениях в пневмоциркуляционной установке и имеют соответствующий фазовый состав.

Таким образом, в ходе процесса переработки происходит разделение частиц по размерам и морфологии, что приводит к изменению фазового состава получаемых фракций.

Использование пневмоциркуляционного метода позволяет получать Al-порошки с высокой дисперсностью, узкой шириной распределения их частиц по размерам и минимальным содержанием фазы  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Это повышает качество синтезируемого из таких порошков AlN.

Из выделенных фракций алюминия СВС-методом в реакторе СП-Р60 был получен нитрид алюминия, обозначенный как СВС-Н. Полученные синтезом в среде азота спеки после дробления были диспергированы и классифицированы на установке К-05 при тех же режимах, что и порошок нитрида алюминия СВС-К.

В табл. 2 приведены данные по гранулометрическому составу и удельной поверхности различных фракций порошков СВС-К и СВС-Н, а также коэффициент  $K$ , учитывающий форму частиц (форм-фактор). Форм-фактор определяется из известного соотношения

$$S_{\text{уд}} \approx \frac{K}{\rho d(3.2)},$$

где  $S_{\text{уд}}$  — удельная поверхность;  $d(3.2) = \sum_{i=1}^n \frac{d_i^3}{d_i^2}$  —

средний поверхностный диаметр частиц ( $d_i$  — диаметр частиц  $i$ -й фракции);  $\rho$  — плотность материала.

Значения  $K$  составляют: для сфер — 6, для

Таблица 2. Удельная поверхность и гранулометрический состав порошков СВС-К и СВС-Н

Марка порошка	Степень классификации	$S_{\text{уд}}^{\text{ВЕТ}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$d_{10}, \text{ мкм}$	$d_{50}, \text{ мкм}$	$d_{90}, \text{ мкм}$	$d(3.2), \text{ мкм}$	$S_{\text{пан}}$	$K$
СВС-К	Остаток	0,47	5,15	7,81	11,81	7,42	0,9	11,8
СВС-К	Исходный	0,68	3,86	9,43	18,93	5,93	1,6	20,5
СВС-К	1	1,13	1,57	3,41	6,87	2,74	1,6	12,3
СВС-Н	1	2,87	0,76	1,56	3,06	1,34	1,5	14,3
СВС-К	2	3,52	0,66	1,24	2,32	1,11	1,4	14,0
СВС-Н	2	6,25	0,62	1,05	1,77	0,97	1,1	21,0
СВС-Н	3	9,89	0,28	0,65	1,28	0,53	1,5	20,6

призм  $\approx 12$ , для пластин  $\approx 18$ , для тонких чешуек  $\approx 18 \div 30$ , для пористых частиц  $K > 30$ .

Для различных фракций AlN параметр  $K$  меняется в диапазоне от 11,8 до 21,0 (см. табл. 2).

При анализе полученных данных выявлены различия:

- в гранулометрическом составе исследуемых порошков на аналогичных ступенях классификации;
- в морфологии (значениях форм-фактора  $K$ ) частиц нитрида алюминия одной и той же марки порошка на разных ступенях классификации;
- в морфологии частиц СВС-К и СВС-Н, выделенных на одной и той же ступени классификации;
- в ширине дифференциальной функции объемного распределения частиц по размерам ( $S_{pan}$ ).

Фотография с оптического микроскопа и функции распределения частиц по размерам (дифференциальная  $F(d)$  и интегральная  $Q(d)$ ) исходного порошка AlN марки СВС-К приведены на рис. 4.

На рис. 5 представлены фотография с оптического микроскопа и функции распределения частиц по размерам порошка AlN марки СВС-К на

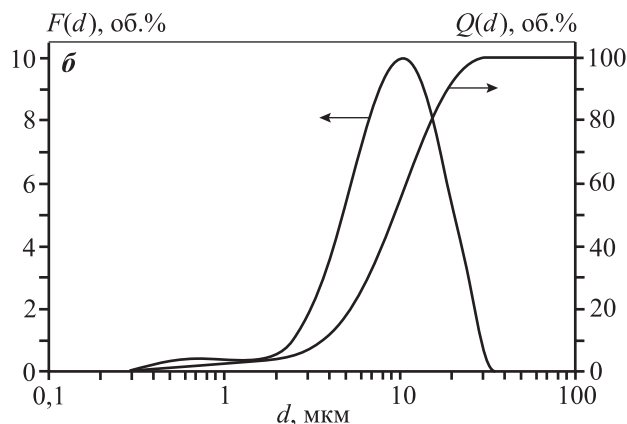
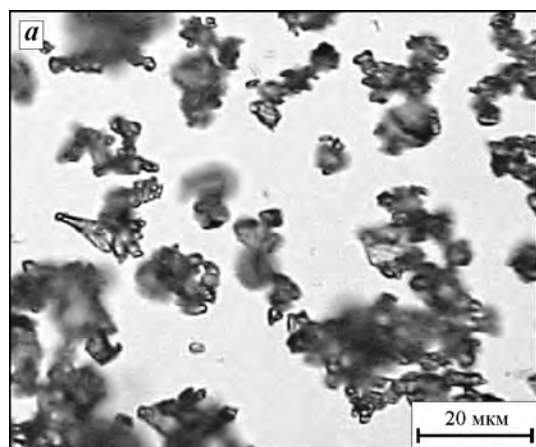


Рис. 4. Фотография ( $\times 500$ ) частиц (а) и функции их объемного распределения по размерам (б) для исходного AlN марки СВС-К

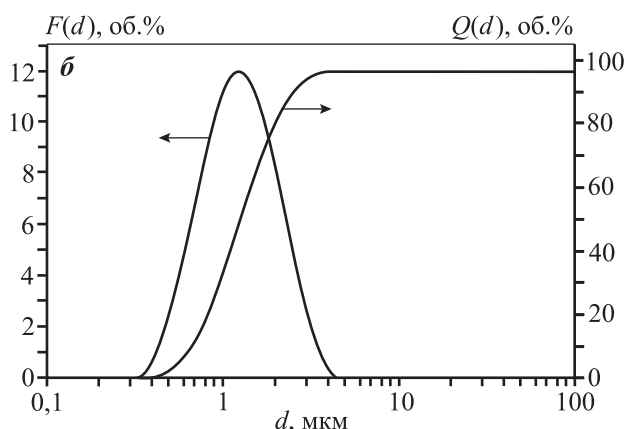
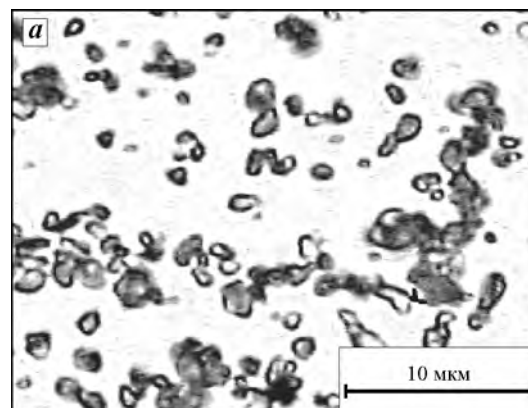


Рис. 5. Фотография ( $\times 1000$ ) частиц (а) и функции их объемного распределения по размерам (б) для фракции порошка AlN марки СВС-К, полученной на 2-й ступени классификации

2-й ступени классификации пневмоциркуляционной установки.

Из полученных результатов следует, что процесс измельчения нитрида алюминия на пневмоциркуляционном аппарате происходит за счет постепенного откалывания острых граней на поверхности частиц, в которых сосредоточены максимальные напряжения (см. рис. 4, а и 5, а).

Из табл. 2 видно, что значение форм-фактора  $K$  изменяется от 20,5 у исходного порошка СВС-К до 11,8 у его остатка в пневмоциркуляционной установке. В процессе обработки в ней разрушение частиц происходит в основном по откольному типу, приводящему к сфероидизации частиц. То есть в процессе измельчения в аппарате крупные частицы изменяют свою морфологию от пластин и чешуек до призматических (ближе к сфере) частиц.

При этом, как и в случае с частицами алюминия, процесс классификации осуществляется не только по размерам, но и по морфологии частиц. Очевидно, что на первой ступени классификации для обоих материалов AlN происходит сепарация



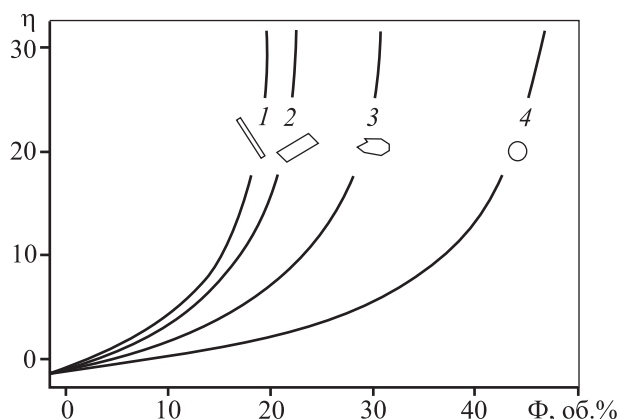
частиц с морфологией, близкой к призме, так как форм-фактор  $K$  у этих частиц составляет порядка 12–14 (см. табл. 2).

Различие в морфологии частиц для разных порошков на одних и тех же ступенях классификации при одинаковых режимах работы пневмоциркуляционного аппарата свидетельствует о том, что были неодинаковыми исходные материалы СВС-К и СВС-Н. Это связано с режимом их СВС-синтеза. Предполагается, что данный факт обусловлен процессами, происходящими после прохождения волны горения, т.е. связан с режимом догорания и темпом остывания образовавшегося спека нитрида алюминия. Именно в этот момент из-за большой разницы градиента температур возникают трещины и напряжения в кристаллической структуре нитрида алюминия.

Шликер с использованием сфероидизированных частиц AlN будет иметь более низкую вязкость при заданной концентрации твердой фазы. Этот вывод подтверждается приведенными в работе [10] данными о влиянии объемного процентного содержания твердой фазы  $\Phi$  и формы частиц на относительную вязкость шликера  $\eta$  (рис. 6).

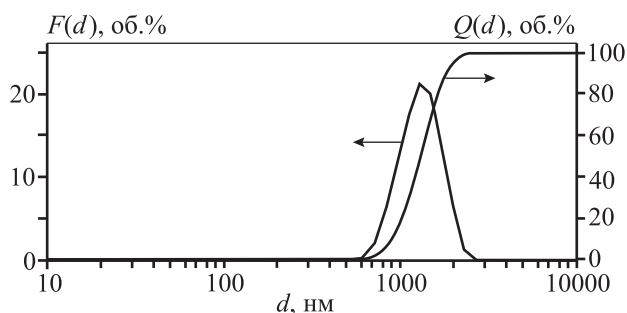
Для контроля реологических свойств шликера, наряду с варьированием состава, размера и морфологии частиц, используются различные физико-химические процессы, связанные с применением поверхностно-активных веществ, диспергаторов, дегазаторов и т.д. [11–14].

Частицы полученного нитрида алюминия СВС-Н были исследованы на устойчивость к агрегированию в водной суспензии.

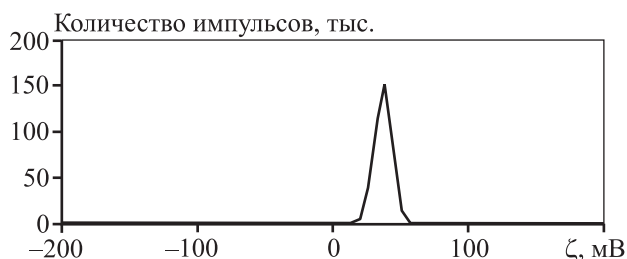


**Рис. 6.** Зависимость относительной вязкости шликера от содержания твердой фазы и формы частиц [11]

1 – палочки, 2 – пластинки, 3 – несферические частицы, 4 – сферы



**Рис. 7.** Функции объемного распределения частиц порошка AlN по размерам при pH = 4



**Рис. 8.** Распределение  $\zeta$ -потенциала порошка AlN при pH = 4

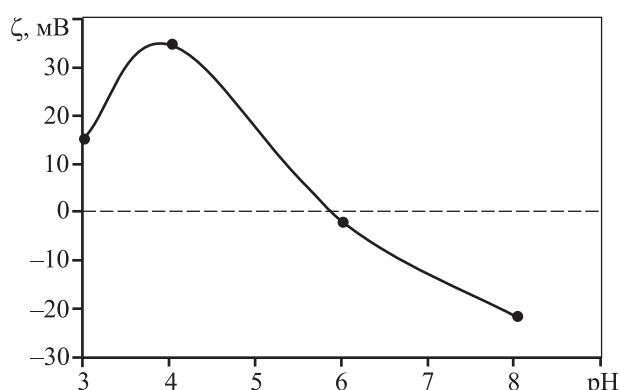
Стабильность состояния частиц в шликере связана с дзета-потенциалом ( $\zeta$ ), который зависит от pH и температуры. Величина  $\zeta$  определяет структурообразование суспензии, так как влияет на агрегацию и дезагрегацию частиц. В [15] утверждается, что наиболее предпочтительное значение  $\zeta$  находится в диапазоне либо  $+10 \div +40$  мВ, либо  $-10 \div -40$  мВ. При  $\zeta < \pm 10$  мВ наблюдается состояние суспензии, когда электростатическое отталкивание является недостаточным для предотвращения агломерации частиц.

В результате исследования полученных частиц AlN (рис. 7) с размером  $d_{50} = 1200$  нм (1,2 мкм) определено влияние pH на их  $\zeta$ -потенциал (рис. 8, 9).

Распределение порошка AlN на рис. 8 представлено в виде зависимости величины  $\zeta$  от количества импульсов, детектируемых прибором «Malvern Zetasizer Nano-ZS».

На рис. 9 приведены значения  $\zeta$ -потенциала в зависимости от водородного показателя дисперсной среды. Видно, что изменение величины pH порошка AlN с 3 до 8 обуславливает изменение значения  $\zeta$  от  $+15$  мВ до  $-23$  мВ.

Максимальным значениям электрокинетического потенциала ( $\zeta$ ) соответствуют наиболее устойчивое к агрегированию состояние шликера и минимальные значения его вязкости, а соответственно, минимальные значения усадки и пористости при обжиге в конечное изделие [12].



**Рис. 9.** Зависимость величины  $\zeta$ -потенциала частиц порошка AlN от pH

Таким образом, в процессах шликерного литья появляется возможность использования pH и температуры, от которых зависит  $\zeta$ -потенциал, в качестве инструмента, позволяющего структурировать частицы за счет изменения системной устойчивости, а в итоге — регулировать эксплуатационные характеристики керамики.

## Заключение

Проведенные исследования показали, что пневмоциркуляционный метод позволяет получать порошковые компоненты высокой дисперсности для синтеза и создания керамики из AlN. Применение метода снижает наличие посторонних примесей в частицах Al относительно исходного материала за счет селективного фракционирования по размерам и морфологии частиц.

Пневмоциркуляционная переработка и многоступенчатое фракционирование порошков дают возможность получения сфероидизированных частиц AlN. Шликер с такими частицами будет иметь более низкую вязкость при заданной концентрации твердой фазы, что подтверждается данными других авторов.

Измерения дзета-потенциала могут быть использованы для оптимизации реологических свойств и предотвращения агрегации (повышения устойчивости) частиц в керамических дисперсных составах. Контроль  $\zeta$ -потенциала является существенным фактором при получении конечного керамического продукта с наименьшим количеством дефектов.

*Авторы выражают признательность сотрудникам Томского регионального Центра коллективного пользования Томского государственного университета за проведение рентгеноструктурных исследований.*

*Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор проекта RFMEFI57814X0027.*

## Литература

1. *Imanaka Y.* Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. Boston: Springer Science Business Media, Inc., 2005.
2. *Чигиринский С.* Особенности и преимущества производства многослойных структур на основе керамики (LTCC, HTCC, MLCC) // Степень интеграции. 2009. No. 2. С. 26–28.
3. *Непочатов Ю., Кумачева С., Швецова Ю., Дитц А.* Разработка отечественного керамического материала для изготовления изделий по технологии LTCC // Соврем. электроника. 2014. No. 4. С. 12–14.
4. *Погребенков В.М., Пашков Д.А.* Стеклокерамические материалы низкотемпературного спекания для электронной техники // Высокие технологии в современной науке и технике: Сб. науч. тр. III междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых (г. Томск, апр. 2014 г.). Томск: Национ. исслед. Томский политехн. ун-т, 2014. С. 139–141.
5. *Непочатов Ю., Земницкая А., Муль П.* Разработка керамики на основе нитрида алюминия для изделий электронной техники // Соврем. электроника. 2011. No. 9. С. 14–18.
6. *Ларина К.В., Дитц А.А.* Разработка составов и исследования свойств шликерных композиций, пленочных материалов и керамики на основе AlN // Современные керамические материалы. Свойства. Технологии. Применение: Тр. междунар. науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, сент. 2011 г.). Новосибирск: Нонпарель, 2011. С. 125–126.
7. *Бирюков Ю.А., Бузник В.М., Дунаевский Г.Е., Ивонин И.В., Ищенко А.Н., Лернер М.И., Лымарь А.М., Обьедков А.Ю., Псахье С.Г., Цветников А.К.* Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение / Под ред. акад. В.М. Бузника. Томск: Изд-во НТЛ, 2009.
8. *Бирюков Ю.А., Иванов А.В., Зорин В.Д., Богданов Л.Н., Шифрис Г.С., Быков А.А., Анциферов В.Н., Кульметьева В.Б., Романдин В.И.* Получение наноразмерных порошков в пневматических циркуляционных аппаратах // Новые перспективные материалы и технологии их получения: Сб. тр. междунар. конф. (г. Волгоград, окт. 2007 г.). Волгоград: Изд-во РПК «Политехник», 2007. С. 24–25.
9. *Полушко В.А.* Особенности получения компонентов для керамики из нитрида алюминия // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. No. 9/3. С. 100–105.
10. *Barnes A., Howard A.* Handbook of elementary rheology.

- Aberystwyth, United Kingdom: University of Wales. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000.
11. Чигиринский С. LTCC-технология. Материалы и подготовка шликера // Электроника НТБ. 2010. Вып. 2. С. 90—92. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/34/> (дата обращения 22.09.2015).
  12. Olhero S.M., Miranzo P., Ferreira J.M.F. AlN ceramics processed by aqueous slip casting // J. Mater. Res. 2006. Vol. 21. No. 10. P. 2460—2469.
  13. Saito K. Use of organic materials for ceramic-modeling process-binder, defloculant, plasticizer, lubricant, solvent, protective colloid // J. Adhes. Soc. Jpn. 1981. Vol. 17. No. 3. P. 104—113.
  14. Saravanan L., Subramanian S. The importance of zeta potential in ceramic processing. (1) Alumina. URL: <http://www.malvern.com/en/support/resource-center/application-notes/AN101104/> (дата обращения 22.09.2015).
  15. Джеймс Х. Адэйр, Стивен А. Константино. Керамическая шликерная композиция и способ ее приготовления: Пат. 2139266 (РФ). 1995.
- ## References
1. Imanaka Y. Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology. Boston: Springer Science Business Media, Inc., 2005.
  2. Chigirinskii S. Osobennosti i preimushchestva proizvodstva mnogoslo'nykh struktur na osnove keramiki (LTCC, HTCC, MLCC) [Features and advantages of the production of multilayer structures based on ceramics (LTCC, HTCC, MLCC)]. *Stepen' integratsii*. 2009. No. 2. P. 26—28.
  3. Nepochatov Yu., Kumacheva S., Shvetsova Yu., Dits A. Razrabotka otechestvennogo keramicheskogo materiala dlya izgotovleniya izdelii po tekhnologii LTCC [Development of domestic ceramic material for the manufacture of LTCC technology]. *Sovremennaya elektronika*. 2014. No. 4. P. 12—14.
  4. Pogrebenkov V.M., Pashkov D.A. Steklokeramicheskie materialy nizkotemperaturnogo spekaniya dlya elektronnoi tekhniki [Ceramic materials for low-temperature sintering of electronic engineering]. In: *Vysokie tekhnologii v sovremennoi nauke i tekhnike [High technologies in modern science and equipment]*: Sbornik nauchnykh trudov III mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh (Tomsk, April 2014). Tomsk: Tomskii politekhnicheskii un-t, 2014. P. 139—141.
  5. Nepochatov Yu., Zemnitskaya A., Mul' P. Razrabotka keramiki na osnove nitrida alyuminiya dlya izdelii elektronnoi tekhniki [Development of ceramics based on aluminum nitride for electronic devices]. *Sovremennaya elektronika*. 2011. No. 9. P. 14—18.
  6. Larina K.V., Dits A.A. Razrabotka sostavov i issledovaniya svoistv shlikernykh kompozitsii, plenochnykh materialov i keramiki na osnove AlN [Development of compositions and study the properties of slip compositions, plastic materials and ceramics based on AlN]. In: *Sovremennye keramicheskie materialy. Svoistva. Tekhnologii. Primenenie [Modern ceramic materials. Properties. Technologies. Application]*. Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Novosibirsk, Sept. 2011). Novosibirsk: Nonparel, 2011. P. 125—126.
  7. Biryukov Yu.A., Buznik V.M., Dunaevskii G.E., Ivonin I.V., Ishchenko A.N., Lerner M.I., Lyar' A.M., Ob'edkov A.Yu., Psakh'e S.G., Tsvetnikov A.K. Ul'tradispersnye i nanorazmernye poroshki: sozdanie, stroenie, proizvodstvo i primeneniye [Ultrafine and nanosized powders: creation, structure, production and application]. Tomsk: Izd-vo NTL, 2009.
  8. Biryukov Yu.A., Ivanov A.V., Zorin V.D., Bogdanov L.N., Shifris G.S., Bykov A.A., Antsiferov V.N., Kul'met'eva V.B., Roman-din V.I. Poluchenie nanorazmernykh poroshkov v pnevmaticheskikh tsirkulyatsionnykh apparatakh [Obtaining of nanosized powders in pneumatic circulation apparatus]. In: *Novye perspektivnye materialy i tekhnologii ikh polucheniya [New perspective materials and technologies of their receiving]*. Sbornik trudov mezhdunar. konf. (Volgograd, Oct. 2007). Volgograd: Izd-vo RPK Politekhnik, 2007. P. 24—25.
  9. Polyushko V.A. Osobennosti polucheniya komponentov dlya keramiki iz nitrida alyuminiya [Especially for producing of components for aluminum nitride ceramic]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2012. Vol. 55. No. 9/3. P. 100—105.
  10. Barnes A., Howard A. Handbook of elementary rheology. Aberystwyth, United Kingdom: University of Wales. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2000.
  11. Chigirinskii S. LTCC-tekhnologiya. Materialy i podgotovka shlikera [LTCC technology. Materials and preparation of slip]. *Elektronika NTB*. 2010. No. 2. P. 90—92. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/34/> (accessed: 22.09.2015).
  12. Olhero S.M., Miranzo P., Ferreira J.M.F. AlN ceramics processed by aqueous slip casting. *J. Mater. Res*. 2006. Vol. 21. No. 10. P. 2460—2469.
  13. Saito K. Use of organic materials for ceramic-modeling process-binder, defloculant, plasticizer, lubricant, solvent, protective colloid. *J. Adhes. Soc. Jpn*. 1981. Vol. 17. No. 3. P. 104—113.
  14. Saravanan L., Subramanian S. The importance of zeta potential in ceramic processing. (1) Alumina. URL: <http://www.malvern.com/en/support/resource-center/application-notes/AN101104/> (accessed: 12.10.2015).
  15. Dzheims Kh. Adeir, Stiven A. Konstantino. Keramicheskaya shlikernaya kompozitsiya i sposob ee prigotovleniya [Ceramic slip composition and method method of its preparation]: Pat. 2139266 (RF). 1995.