

УДК 533.583.2 : 544.478.32

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-4-10

## Исследование адсорбционных свойств ультрадисперсного порошка нитрида алюминия до и после обработки водой

© 2018 г. **А.В. Рябина, В.Г. Шевченко**

Институт химии твердого тела (ИХТТ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 16.12.16 г., доработана 10.04.17 г., подписана в печать 12.04.17 г.

Представлены результаты исследования адсорбционно-структурных особенностей взаимодействия нанодисперсного порошка нитрида алюминия с водой, в частности морфология и фазовый состав продуктов окисления. Рассчитаны удельная поверхность и пористость порошков. Анализируются особенности изотерм адсорбции исследуемых образцов до и после взаимодействия с водой с точки зрения соответствия их конкретному типу согласно рекомендациям Международного союза по теоретической и прикладной химии (IUPAC), а также определенному виду пористости, что необходимо для понимания области их дальнейшего применения. Обсуждается механизм взаимодействия порошка нитрида алюминия с водой. Показано, что имеет место ионно-адсорбционный механизм с формированием пористых агломератов, состоящих из нанопластин оксигидроксида алюминия игольчато-пластинчатой формы, соединенных контактами, с диаметром пор 55 Å. Удельная поверхность при этом возрастает с 48 до 115 м<sup>2</sup>/г. Установлено, что в результате взаимодействия нанопорошка AlN с водной средой происходит изменение фазового состава – продукты взаимодействия представлены фазами AlO(OH), Al(OH)<sub>3</sub>.

**Ключевые слова:** адсорбция, ультрадисперсные порошки, поры, удельная поверхность, ионность связи, ионно-адсорбционный механизм, нитрид алюминия.

**Рябина А.В.** – канд. хим. наук, науч. сотр. ИХТТ УрО РАН (620990, г. Екатеринбург, ул. Первомайская, 91).  
E-mail: anna-ryabina@yandex.ru.

**Шевченко В.Г.** – докт. хим. наук, гл. науч. сотр., зав. лабораторией ИХТТ УрО РАН. E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru.

**Для цитирования:** Рябина А.В., Шевченко В.Г. Исследование адсорбционных свойств ультрадисперсного порошка нитрида алюминия до и после обработки водой // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2018. No. 1. С. 4–10. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-4-10.

*Ryabina A.V., Shevchenko V.G.*

### **Studying adsorption peculiarities of ultradispersed aluminum nitride powder before and after water treatment**

The paper presents the results obtained when studying the adsorption and structural peculiarities of aluminum nitride nanopowder interaction with water, particularly the morphology and phase composition of oxidation products. Powder surface areas and porosities are calculated. The peculiarities of the adsorption isotherms of the investigated samples are analyzed before and after interaction with water in terms of their correspondence to a certain type according to the recommendation of the International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC), as well as to a certain porosity type, which is necessary for the understanding of their further application. The mechanism of aluminum nitride powder and water interaction is discussed. It is shown that aluminum nitride interacts with water by the ion-adsorption mechanism that leads to the formation of porous agglomerates consisting of needle and platelet shaped aluminum oxyhydroxide nanoplates connected by contacts with pores 55 Å in diameter. Specific surface area increases from 48 to 115 m<sup>2</sup>/g. It is also found that phase composition changes as a result of AlN nanopowder interaction with aqueous environment, and interaction products are represented by AlO(OH) and Al(OH)<sub>3</sub> phases.

**Keywords:** adsorption, ultradispersed powders, pores, specific surface, bond ionicity, ion-adsorption mechanism, aluminum nitride.

**Ryabina A.V.** – Cand. Sci. (Chem.), researcher of the Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSC UB RAS) (620990, Russia, Ekaterinburg, Pervomaiskaya str., 91).  
E-mail: anna-ryabina@yandex.ru.

**Shevchenko V.G.** – Dr. Sci. (Chem.), chief research scientist, head of the laboratory, ISSC UB RAS.  
E-mail: shevchenko@ihim.uran.ru.

**Citation:** Ryabina A.V., Shevchenko V.G. Issledovanie adsorbtsionnykh svoystv ul'tradispersnogo poroshka nitrída alyuminiya do i posle obrabotki vodoi. *Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya*. 2018. No. 1. P. 4–10.  
DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2018-1-4-10.

## Введение

Соединения металлов с азотом представляют особый интерес благодаря изменению в широких пределах характера химической связи и физико-химических свойств. Нитрид алюминия (AlN) является единственным техническим керамическим материалом, который обладает чрезвычайно интересным сочетанием крайне высокой теплопроводности и отличных изоляционных свойств. Монокристаллический AlN имеет теплопроводность около 350 Вт/(м·К), что сравнимо и даже превосходит теплопроводность меди. Он устойчив в различных коррозионных средах, инертен по отношению к расплавам многих металлов и сплавов, характеризуется низким коэффициентом термического расширения, что обуславливает высокую термостойкость изделий [1–7]. Керамика из нитрида алюминия перспективна для использования в качестве электроизоляторов и огнеупоров.

Нитрид алюминия также применяется в областях машиностроения и металлургии благодаря сочетанию ценных механических и физических свойств. Так, например, в работе [8] было показано, что добавка AlN в карандаш твердой смазки способствует значительному улучшению трибологических характеристик при абразивной обработке различных металлов и сплавов. Использование ультрадисперсного порошка AlN приводит к быстрому образованию лакирующего слоя. Снижается контактная температура в зоне резания до 30 %, что уменьшает вероятность появления прижогов и трещин в поверхностном слое шлифуемых деталей. Известно также применение нитрида алюминия как защитного покрытия на биоинженерных материалах [3–7, 9].

Целью данной работы являлось изучение физико-химических свойств (морфологии, текстуры, фазового состава и адсорбции) продуктов реакции взаимодействия нанопорошка нитрида алюминия с водой методами низкотемпературной адсорбции азота, рентгенофазового анализа (РФА), электронной микроскопии.

## Экспериментальная часть

Адсорбционные измерения проводили на объемной вакуумной статической автоматизированной установке «Sorptomatic» (фирма «Carlo Erba Strumentazione», Италия) при температуре жидкого азота в области значений относительного да-

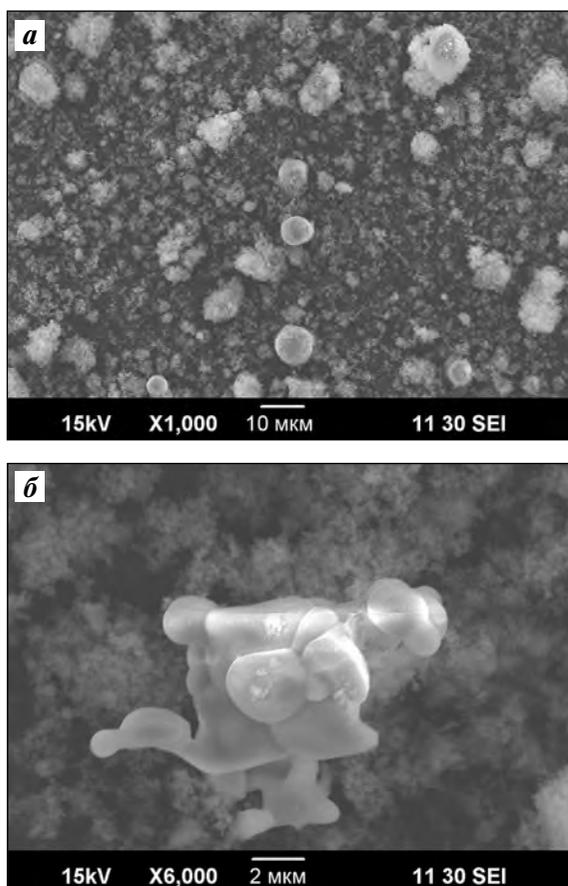
вления  $P/P_s = 10^{-3} \pm 0,999$ . Диапазон измерения этим методом удельной поверхности составлял от 0,2 до 300 м<sup>2</sup>/г, погрешность измерения — не более 15 %. Расчет удельной поверхности подробно описан в работе [10]. До и после эксперимента все образцы взвешивали на электронных весах высокой точности марки «Shimadzu AUW 120D» («Shimadzu Corporation», Япония). Процедура синтеза сплава аналогична описанной ранее [11]. Всю серию измерений проводили в одной и той же измерительной бюретке. Объекты исследования настоящей работы были получены распылением расплавов азотом с последующей газоплазменной переконденсацией их в условиях низкотемпературной плазмы на установках ГНИИХТЭОС (Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений, г. Москва) [12].

## Результаты исследований и их обсуждение

С целью изучения формы и морфологии частиц порошков, от которых зависит их физико-химическая активность, были сделаны снимки на растровом электронном микроскопе, которые представлены ниже. Электронно-микроскопическое исследование порошка показывает, что образец состоит из частиц, форма которых близка к сферической (рис. 1, а). После плазменной переконденсации мелкая фракция окружает исходные частицы, образуя сетку на их поверхности. За счет этой сетки удельная поверхность данных порошков увеличивается более чем на порядок. Удельная поверхность порошка AlN составила 48 м<sup>2</sup>/г.

Благодаря высокой поверхностной энергии и химической активности наночастицы уже в процессе синтеза образуют агломераты, которые хорошо видны при увеличении почти в 6000 раз (см. рис. 1, б). Вероятно, при конденсации атомов из паровой фазы в условиях установки, нормального давления, температур низкотемпературной плазмы (4000–6000 К) и скоростей охлаждения 10<sup>5</sup>–10<sup>6</sup> К/с частота их соударений достаточна для осуществления физического взаимодействия. При последующем сближении на меньшее расстояние образуется химическая связь, возникают центры кристаллизации, на которые из паровой фазы адсорбируются следующие атомы.

Соединения нитридов непереходных металлов принято считать построенными по ковалентно-



**Рис. 1.** Микрофотографии порошка AlN до обработки водой

ионному типу с очень малой долей металлической связи в некоторых из них [1]. Расчет энергетического спектра валентных электронов нитрида алюминия в работе [13] также позволил сделать заключение о ковалентно-ионном характере связи. Говоря о полигенности химической связи в нитриде алюминия, можно посчитать долю ее ионности. Отметим, что термин «моно-полигенные сплавы» впервые применил Д.К. Белашенко [14] при анализе межчастичных взаимодействий в металлических расплавах со смешанным типом химической связи. Долю ионности химической связи нитрида алюминия рассчитывали по уравнению (1), значения электроотрицательности ( $\chi$ ) брали из [15]. Заметим, что литературные данные об электроотрицательности элементов различаются весьма существенно. Так, например, в работе [16] (авторы A.L. Allred, E.G. Rochow) для алюминия приводится значение  $\chi = 1,47$  эВ, а расчет в [17] (L. Pauling) дает величину  $\chi = 1,61$  эВ.

Оценим долю ионности химической связи в нитриде алюминия по уравнению [18]:

$$n = 1 - \xi = 1 - \exp[-(\chi_a - \chi_b)^2/4], \quad (1)$$

где  $\xi$  — степень ковалентности (гомеополярности).

Расчеты показали, что в нитриде алюминия доля ионности химической связи составляет ~63 %.

Частицы порошков, полученных газоплазменной переконденсацией, имеющие форму, близкую к сферической, окислялись дистиллированной водой при комнатной температуре в течение 48 ч. Затем образец проходил стандартную тренировку длительностью 2 ч в вакууме при  $t = 200$  °С до остаточного давления ниже 1 Па перед измерением адсорбции. После взаимодействия с водой происходит разложение нитрида алюминия. Частицы порошка AlN в водной среде, согласно данным РФА, на своей поверхности имеют слой продуктов гидролиза в виде AlO(OH), Al(OH)<sub>3</sub>.

В работе [19] изучено взаимодействие порошка нитрида алюминия с различными средами, в том числе с дистиллированной водой. В среде воды ионизация молекул Al(OH)<sub>3</sub>, находящихся на поверхности наночастиц, происходит по схеме Al(OH)<sub>3</sub> = Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> + OH<sup>-</sup>. В соответствии с правилом избирательной адсорбции Пескова—Панета—Фаянса [20] преимущественно адсорбируются ионы, входящие в состав адсорбента или образующие с его ионами малорастворимые соединения. Именно Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> + OH<sup>-</sup>, а также атомы алюминия, согласно вышеупомянутому правилу, будут играть роль потенциалопределяющих ионов в этой дисперсной системе. Потенциалопределяющим ионом в данном случае является ион Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>, противоионом — OH<sup>-</sup>. Наночастица при этом будет заряжена положительно. Измерение электрокинетического потенциала дало возможность утверждать, что взаимодействие порошка нитрида алюминия с дистиллированной водой происходит с образованием положительно заряженных коллоидных частиц вследствие преимущественной диссоциации золя Al(OH)<sub>3</sub> по основному типу [19]. Взаимодействие происходит по ионно-адсорбционному механизму. Определенная доля ионной связи в молекулах нитрида алюминия, т.е. ковалентно-ионный характер химической связи, снижает устойчивость порошка AlN в среде воды.

Мощным средством исследования текстуры и генезиса пор в процессе приготовления активных твердых тел являются изотермы адсорбции азота, снятые при температуре жидкого азота. Количественные текстурные характеристики, которые могут быть получены из изотермы адсорбции

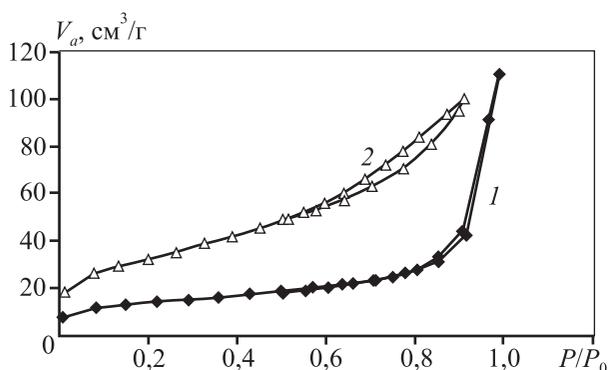


Рис. 2. Изотермы адсорбции AlN до (1) и после (2) взаимодействия с водой

(объем пор, удельная поверхность, средний радиус пор и распределение пор по радиусам), очень важны, поскольку с их помощью можно описать текстуру (пористую структуру) любого вещества.

Силу адсорбционного взаимодействия поверхности адсорбента с парами адсорбата оценивали по характеру начального участка экспериментальной изотермы адсорбции при низких относительных давлениях пара азота ( $P/P_0 < 0,2$ ) при незначительной степени заполнения адсорбционных центров. Изотермы адсорбции для образца AlN до и после гидрообработки (ГО) существенно отличаются друг от друга (см. рис. 2).

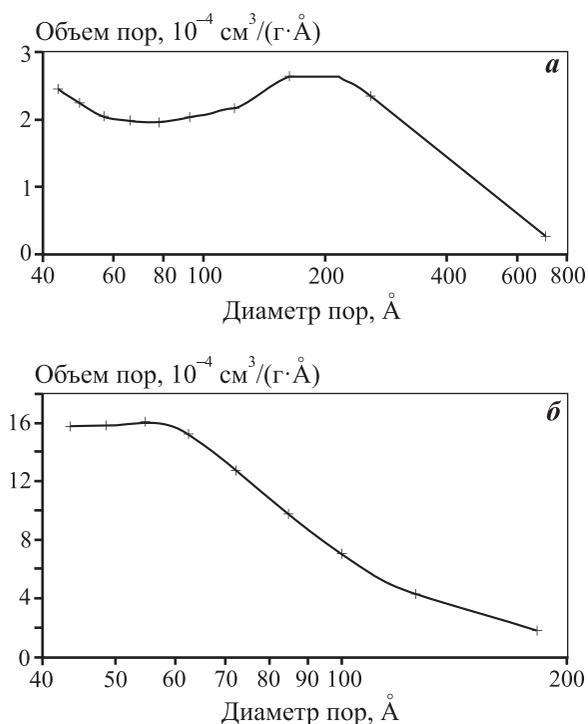
На изотерме до ГО азот слабо адсорбируется, что выражается в уменьшении наклона изотермы в начальной области, до тех пор пока величина  $P/P_0$  не станет достаточно большой ( $P/P_0 = 0,8$ ). Затем кривая резко поднимается вверх и при  $P/P_0 = 1$  достигает предельной адсорбционной емкости. Слабый гистерезис свидетельствует о капиллярной конденсации — вероятно, вблизи точек контакта соприкасающихся сферических частиц. Для образца поры представляют зазоры между частицами скелета. Проблема капиллярной конденсации в промежутках между сферическими частицами более детально изучена авторами [21], которые показали, что сначала капиллярная конденсация происходит вблизи точек соприкосновения частиц, а на следующей ее стадии седлообразные мениски соединяются вместе. Изотерма адсорбции принадлежит к типу 2 по классификации БДДТ (Брунауэр—Деминг, Деминг—Теллер) согласно рекомендациям Международного союза по теоретической и прикладной химии (IUPAC) [21], что соответствует непористому или макропористому телу. Этот тип изотерм представляет свободную моно-полислойную адсорбцию. Форма изотер-

мы согласуется с представлением о системе рыхло упакованных непористых частиц с размерами порядка нескольких микрон.

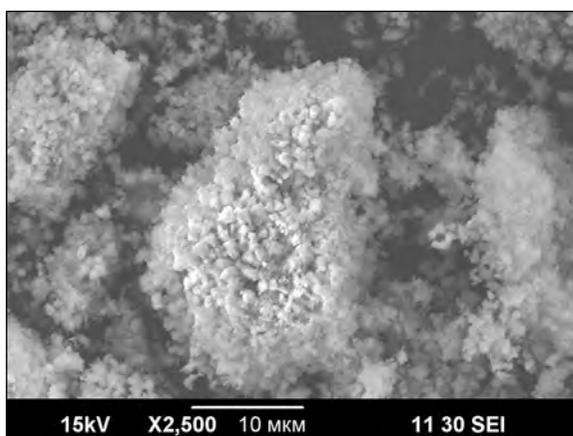
Гидратация порошка AlN вызывает увеличение подъема изотермы адсорбции в мономолекулярной области (благодаря тому, что после ГО поверхность покрыта гидроксильными группами), что говорит о сильном взаимодействии адсорбат—адсорбент. Адсорбционная ветвь образца после ГО выпуклая при малых относительных давлениях. В области насыщения изотерма имеет характерный изгиб, обусловленный переходом полимолекулярной адсорбции в капиллярную конденсацию. Образец AlN, обработанный водой, согласно рекомендациям IUPAC [21], соответствует 4-му типу по классификации БДДТ. Окисление частиц порошка AlN водой приводит к резкому повышению его удельной поверхности до  $115 \text{ м}^2/\text{г}$ . Петля гистерезиса на изотерме в процессе десорбции смыкается ранее, чем относительное давление достигнет величины 0,3, что показывает отсутствие микропор.

Изотермы адсорбции в обоих случаях (до и после обработки водой) обратимы в мономолекулярной области. Как известно [22], каждый тип петли гистерезиса связан с определенным типом пористой структуры. Для изотермы адсорбции после ГО форма гистерезисной петли соответствует щелевидным порам (тип В согласно классификации de Boer [21]). В щелевидных порах, открытых со всех сторон, заполнение осуществляется посредством формирования полимолекулярного слоя, который в определенный момент целиком заполняет пространство между стенками щели. В этот момент возникает мениск, и испарение в ходе десорбции будет контролироваться уже этим мениском. Для расчета размера пор целесообразнее брать десорбционную кривую в интервале относительных давлений от 0,95 до 0,3, так как именно она соответствует полному смачиванию стенок пор [21, 22]. По результатам эксперимента были построены дифференциальные кривые распределения объема пор по их эффективным диаметрам (рис. 3).

Фазовый состав исследуемых образцов до и после испытаний определяли методом РФА на дифрактометре XRD-6000 («Shimadzu Corporation», Япония) ( $\text{CuK}_\alpha$ -излучение,  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) с использованием банка картотеки стандартов JCPDS. Диапазон углов сканирования составлял  $2\theta = 1\text{--}100^\circ$  при скорости сканирования 1 град/мин. Рентгенофазовый анализ показал, что до взаимодействия с



**Рис. 3.** Дифференциальная кривая распределения объема пор по их эффективным диаметрам до гидрообработки порошка AlN (а) и после (б)  
 Общий объем пор составил 0,116073 (а) и 0,164392 (б) см<sup>3</sup>/г, средний диаметр пор – 209 (а) и 55 (б) Å



**Рис. 4.** Микрофотография порошка AlN после обработки водой

водой порошок AlN представлен фазами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и AlN. Поскольку порошок нитрида алюминия, полученный плазмохимическим методом, в силу своей дисперсности чувствителен к влаге воздуха, условия хранения повлияли на содержание азота, которое изначально не превышало 24 мас.%. После гидрообработки в составе образцов присутствуют фазы AlO(OH), Al(OH)<sub>3</sub>.

С целью изучения формы и морфологии частиц порошков после ГО, были сделаны снимки на растровом электронном микроскопе (рис. 4). Их анализ показывает, что нанопластины оксигидроксида алюминия расположены слоями на поверхности частиц и соединены между собой в агломераты. За счет таких многочисленных слоев частицы заметно укрупнились. Слои нанопластин создают определенную пористую структуру на поверхности частиц, что также обуславливает адсорбционную активность.

### Заключение

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Взаимодействие нитрида алюминия с водой приводит к образованию пористых агломератов, состоящих из нанопластин оксигидроксида алюминия игольчато-пластинчатой формы, соединенных контактами. Агломерированные наночастицы характеризуются щелевидными наноразмерными порами, средний диаметр которых составляет 55 Å. Удельная поверхность порошка AlN после гидрообработки возрастает до 115 м<sup>2</sup>/г. Взаимодействие нитрида алюминия с водой происходит по ионно-адсорбционному механизму. Определенная доля ионной связи (ее возникновение обусловлено переходом электронов от части атомов алюминия к атомам азота с образованием конфигураций 3s<sup>0</sup>3p<sup>0</sup> для алюминия и 2s<sup>2</sup>2p<sup>6</sup> для азота) в молекулах нитрида алюминия, т.е. ковалентно-ионный характер химической связи, снижает устойчивость порошка AlN в среде воды. Доля ионности химической связи в нитриде алюминия составила около 63 %.

В результате негерметичных условий хранения и из-за чувствительности порошка AlN, полученного плазмохимическим методом, к влаге воздуха в силу его дисперсности (он легко гидролизуется), содержание азота изначально не превышало 24 мас.%. Эти особенности, вероятно, повлияли и на состав продуктов взаимодействия ультрадисперсного порошка AlN с водой — они представлены фазами AlO(OH) и Al(OH)<sub>3</sub>.

Поскольку различным областям применения требуются новые сорбционные материалы со специфическим набором физико-химических свойств, с открытой системой пор и большой удельной поверхностью, необходимы дальнейшие исследования реакций взаимодействия нанопорошков

алюмонитридной композиции с водой, в которых учитывались бы все факторы, влияющие на протекание процесса, с последующим определением полного комплекса свойств полученных продуктов.

## Литература

1. Самсонов Г.В. Нитриды. Киев: Наук. думка, 1969.
2. Гаршин А.П., Швайко-Швайковский В.Е. Особенности кинетики и механизма процесса взаимодействия нитрида алюминия с газовыми средами // Огнеупоры и техн. керамика. 1999. No. 11. С. 31—35.
3. Ramisetty Mohan, Sastri Suri, Kashalikar Uday. Manufacturing of aluminium nitride powder for advanced applications // Am. Ceram. Soc. Bull. 2014. Vol. 93. No. 6. P. 28—32.
4. Seong Min Jeonga, Kang Hyuk Leea, Myung Hyun Leea, Won Seon Seoa, Jonghee Hwanga, Seung Min Kangb, Younghee Kima. Efficient particle size control and purification of AlN powder using thermocyclic process, for use in crystal growth // J. Ceram. Process. Res. 2014. Vol. 15. No. 6. P. 497—502.
5. Weimer Alan W., Cochran Gene A., Eisman Glenn A., Henley John P., Hook Bruce D., Mills Lynne K., Guiton Theresa A., Knudsen Arne K., Nicholas Nicholas R., Volmering James E., Moore William G. Rapid process for manufacturing aluminum nitride powder // Am. Ceram. Soc. 1994. Vol. 77. Iss. 1. P. 3—18.
6. Collange A., Grosseau P., Guilhot B., Disson J.P., Joubert P. Thermal conductivity of compacted AlN samples // J. Europ. Ceram. Soc. 1997. No. 17. P. 1897—1900.
7. Greil P., Kulig M., Hotza D. Aluminium nitride ceramics with high thermal conductivity from gas-phase synthesized powders // J. Europ. Ceram. Soc. 1994. No. 3. P. 229—237.
8. Шевченко В., Рябина А., Торокин В., Алехина В. Смазочная композиция с антиприжоговой добавкой для улучшения абразивной обработки материалов // Наноиндустрия. 2015. No. 4. С. 72—78.
9. Васильев В.В., Лучанинов А.А., Стрельницкий В.Е., Толстоуцкая Г.Д., Копанец И.Е., Севидова Е.К., Кононенко В.И. Свойства нитрида алюминия как защитного покрытия на биоинженерных материалах // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. 2005. Т. 86. No. 3. С. 167—170.
10. Рябина А.В., Кононенко В.И. Удельная поверхность дисперсных материалов на основе алюминия // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2014. No. 2. С. 3—7.
11. Рябина А.В., Кононенко В.И., Торокин В.В. Свойства сплавов системы Al—La в жидком, твердом и дисперсном состоянии // Металлы. 2013. No. 5. С. 9—12.
12. Шевченко В.Г., Малашин С.И., Латош И.Н., Чупова И.А., Григоров И.Г., Кочедыков В.А. Свойства высокодисперсных сплавов Al—PЗМ, полученных методом плазменной перекомденсации // Персп. материалы. 2010. No. 1. С. 68—75.
13. Mroz Thomas Jr. Aluminium nitride // Am. Ceram. Soc. Bull. 1992. Vol. 71. No. 5. P. 782—784.
14. Белащенко Д.К. Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Атомиздат, 1970.
15. Корнилов И.И., Матвеева Н.М., Пряхина Л.И., Полякова Р.С. Металлохимические свойства элементов Периодической системы: Справочник. М.: Наука, 1966.
16. Alfred A.L., Rochow E.G. A scale of electronegativity based on electrostatic force // J. Inorg. Nucl. Chem. 1958. Vol. 5. Iss. 4. P. 264—268.
17. Pauling L. The nature of the chemical bond. 3-rd. ed. N.Y.: Cornell Ithaca, 1960.
18. Day M. Clyde, Selbin Joe. Theoretical inorganic chemistry. 2-nd ed. N.Y., Amsterdam, London: Reinhold Book Corp., 1969.
19. Бошицкая Н.В. Сравнительная устойчивость порошков нитридов кремния и алюминия в биологических и неорганических средах // Нанострукт. материаловедение. 2009. No. 2. С. 111—120.
20. Жолнин А.В. Общая химия: Учебник / Под. ред. В.А. Попкова, А.В. Жолнина. М: ГЭОТАР-Медиа, 2012.
21. Gregg S.J., Sing K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. London: Acad. Press, 1982.
22. Строение и свойства адсорбентов и катализаторов / Под ред. Б.Г. Линсена. М.: Мир, 1973.

## References

1. Samsonov G.V. Nitridy [Nitrides]. Kiev: Nauk. dumka, 1969.
2. Garshin A.P., Shvaiko-Shvaikovskii V.E. Osobennosti kinetiki i mekhanizma protsessa vzaimodeistviya nitrida alyuminiya s gazovymi sredami [Peculiarities of kinetics and mechanism of interaction process of aluminum nitride with gaseous media]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 1999. No. 11. P. 31—35.
3. Ramisetty Mohan, Sastri Suri, Kashalikar Uday. Manufacturing of aluminium nitride powder for advanced applications. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 2014. Vol. 93. No. 6. P. 28—32.
4. Seong Min Jeonga, Kang Hyuk Leea, Myung Hyun Leea, Won Seon Seoa, Jonghee Hwanga, Seung Min Kangb, Younghee Kima. Efficient particle size control and puri-

- fication of AlN powder using thermocyclic process, for use in crystal growth. *J. Ceram. Process. Res.* 2014. Vol. 15. No. 6. P. 497–502.
5. Weimer Alan W., Cochran Gene A., Eisman Glenn A., Henley John P., Hook Bruce D., Mills Lynne K., Guiton Theresa A., Knudsen Arne K., Nicholas Nicholas R., Volmering James E., Moore William G. Rapid process for manufacturing aluminum nitride powder. *Am. Ceram. Soc.* 1994. Vol. 77. Iss. 1. P. 3–18.
  6. Collange A., Grosseau P., Guilhot B., Disson J.P., Joubert P. Thermal conductivity of compacted AlN samples. *J. Europ. Ceram. Soc.* 1997. No. 17. P. 1897–1900.
  7. Greil P., Kulig M., Hotza D. Aluminium nitride ceramics with high thermal conductivity from gas-phase synthesized powders. *J. Europ. Ceram. Soc.* 1994. No. 3. P. 229–237.
  8. Shevchenko V., Ryabina A., Torokin V., Alekhina V. Смазочная композиция с антипризгоговой добавкой для улучшения абразивной обработки материалов [Lubricant composition to improve abrasive materials processing]. *Nanoindustriya.* 2015. No. 4. P. 72–78.
  9. Vasil'ev V.V., Luchaninov A.A., Strel'nitskii V.E., Tolstolutsкая G.D., Kopanets I.E., Sevidova E.K., Kononenko V.I. Svoistva nitrída alyuminiya kak zashchitnogo pokrytiya na bioinzhenernykh materialakh [The properties of aluminum nitride as a protective coating on bioengineering materials]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie.* 2005. Vol. 86. No. 3. P. 167–170.
  10. Ryabina A.V., Kononenko V.I. Udel'naya poverkhnost' dispersnykh materialov na osnove alyuminia [Surface area of dispersion materials on the basis of aluminium]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya.* 2014. No. 2. P. 3–7.
  11. Ryabina A.V., Kononenko V.I., Torokin V.V. Svoistva splavov sistemy Al–La v zhidkom, tverdom i dispersnom sostoyanii [The properties of alloys of Al–La system in liquid, solid and dispersed states]. *Metally.* 2013. No. 5. P. 9–12.
  12. Shevchenko V.G., Malashin S.I., Latosh I.N., Chupova I.A., Grigorov I.G., Kochedykov V.A. Svoistva vysokodispersnykh splavov Al–RZM, poluchennykh metodom plazmennoi perekondensatsii [The properties of finely dispersed Al–REM alloys produced by plasma recondensation method]. *Perspektivnye materialy.* 2010. No. 1. P. 68–75.
  13. Mroz Thomas Jr. Aluminium nitride. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 1992. Vol. 71. No. 5. P. 782–784.
  14. Belashchenko D.K. Yavleniya perenosa v zhidkikh metalakh i poluprovodnikakh [Transport phenomena in liquid metals and semiconductors]. Moscow: Atomizdat, 1970.
  15. Kornilov I.I., Matveeva N.M., Pryakhina L.I., Polyakova R.S. Metallokhimicheskie svoistva elementov Periodicheskoi sistemy [Metal-chemical properties of elements of the Periodic system]. Moscow: Nauka, 1966.
  16. Allred A.L., Rochow E.G. A scale of electronegativity based on electrostatic force. *J. Inorg. Nucl. Chem.* 1958. Vol. 5. Iss. 4. P. 264–268.
  17. Pauling L. The nature of the chemical bond. 3-rd. ed. N.Y.: Cornell Ithaca, 1960.
  18. Day M. Clyde, Selbin Joe. Theoretical inorganic chemistry. 2-nd ed. N.Y., Amsterdam, London: Reinhold Book Corp., 1969.
  19. Boshitskaya N.V. Sravnitel'naya ustoichivost' poroshkov nitridov kremniya i alyuminiya v biologicheskikh i neorganicheskikh sredakh [Comparative stability of silicon and aluminum nitride powders in biological and inorganic media]. *Nanostrukturnoe materialovedenie.* 2009. No. 2. P. 111–120.
  20. Zholnin A.V. Obshchaya khimiya [General chemistry]. Eds. V.A. Popkov, A.V. Zholnin. Moscow: GEOTAR-Media, 2012.
  21. Gregg S.J., Sing K.S.W. Adsorption, surface area and porosity. London: Acad. Press, 1982.
  22. Stroenie i svoistva adsorbentov i katalizatorov [Structure and properties of adsorbents and catalysts]. Ed. B.G. Linsen. Moscow: Mir, 1973.