

6. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, 1904.
7. Rana P., Bhargava R. Numerical study of heat transfer enhancement in mixed convection flow along a vertical plate with heat source/sink utilizing nanofluids // Commun Nonlinear Sci Numer Simulat. – 2011. – Vol. 16. – P. 4318–4334.

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОВМЕСТНЫХ ДОБАВОК НАНОПОРОШКА ALN, ПОЛУЧЕННОГО ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ, И МИКРОННОГО ПОРОШКА Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> НА КОНЕЧНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ, ОСНОВАННОЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПОРОШКЕ ALN**

<sup>1</sup>М.И. Гуков, <sup>2</sup>И.И. Шаненков, <sup>1</sup>А.И. Циммерман  
<sup>1,2</sup>Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭПП, <sup>1</sup>гр. 5А4Д

### **Введение**

Актуальной задачей силовой и микроэлектроники является увеличение эффективности рассеяния тепла [1]. Одним из наиболее распространенных способов рассеяния тепла является его отвод через подложку. Раньше в качестве материала теплоотводящей подложки использовали BeO, который обладает высокими значениями теплопроводности и диэлектрической константы [2], но из-за его высокой токсичности от него были вынуждены отказаться. Сейчас значительно распространены керамические подложки из нитрида алюминия, который помимо высоких значений теплопроводности и диэлектрической константы совершенно не токсичен [3].

Известно, что для получения высокоплотной керамики на основе AlN можно использовать модифицирующие добавки (добавки, активирующие спекание, добавки раскисляющих фтористых соединений редкоземельных металлов, углерода или активных металлов, оксидов иттрия, магния и кальция). Наиболее часто используемой из них является добавка оксида иттрия. Кроме того, считается, что даже небольшая добавка нанопорошка может значительно улучшать свойства объемных материалов. Существуют различные способы получения нанопорошков: термолиз, золь-гель метод, электрохимический метод, плазмохимические методы. Последние из них обладают следующими преимуществами: высокая скорость протекания реакции, низкие энергозатраты, высокие достигаемые энергетические параметры в процессе синтеза и высокая скорость охлаждения. Одним из таких является метод плазмодинамического синтеза на основе импульсного сильноточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) [4], разработанного в НИ ТПУ.

В данной работе рассматривается влияние совместных добавок нанопорошка нитрида алюминия, полученного плазмодинамическим способом, и коммерческого порошка оксида иттрия на конечные свойства керамики, основанной на промышленном порошке AlN марки ТЧ-1.

## Синтез нанопорошка AlN

Для реализации эксперимента по получению нанодисперсного нитрида алюминия с использованием только газообразного прекурсора были выбраны следующие энергетические параметры:  $U_{зар} = 2$  кВ,  $C_{зар} = 14,4$  мФ. Газообразный прекурсор (азот) закачивался в предварительно вакуумированную камеру-реактор (1 атм.). Твердый прекурсор (меламин) массой 0.5 г дополнительно закладывался в канал формирования плазменной структуры.

Получившийся порошкообразный продукт был подвергнут ультразвуковому диспергированию в ультразвуковой ванне Ultrasonic Cleaner 50 Вт в течение 8 минут в изопропиловом спирте. После этого продукт разливался в 2 разные чашки Петри: в одной мелкая фракция, в другой – осадок. Далее изопропиловый спирт выпаривался, и собирались образцы.

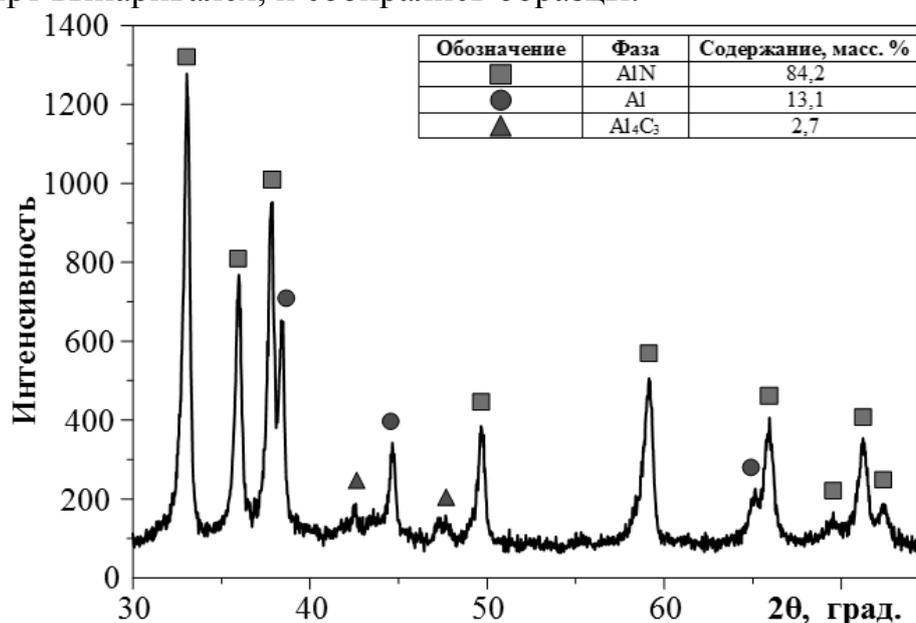


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма полученного порошка

Конечный порошкообразный продукт был исследован методом рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000S. Оценка количественно-фазового состава проводилась с помощью полученных рентгеновских дифрактограмм в программной среде «PowderCell 2.4» с использованием базы данных PDF 2+. Из рентгеновской дифрактограммы полученного продукта (рисунок 1) видно, что фаза нитрида алюминия является доминирующей, а интенсивность пиков фаз алюминия и карбида алюминия является достаточно низкой. Количественный анализ установило приблизительное процентное содержание фаз: AlN – 84%, Al – 13%, Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> – 3%.

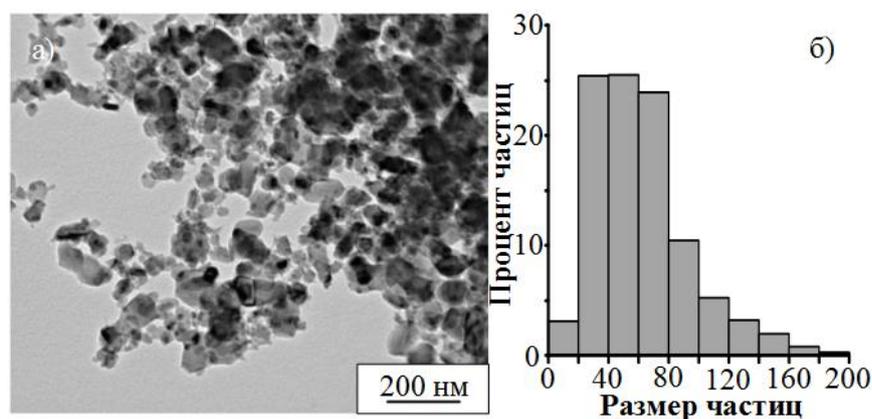


Рис. 2. а) ТЕМ-снимок полученного порошка; б) гистограмма распределения частиц по размеру в исследуемом порошке

Исследование полученного продукта методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе Philips CM-12 (типичный светлопольный снимок представлен на рисунке 2а) позволило установить, что большинство частиц имеют гексагональную структуру, что характерно для фазы гексагонального нитрида алюминия AlN. По полученной серии светлопольных снимков была построена гистограмма распределения частиц по размеру (рисунок 2б), согласно которой большинство частиц в исследуемом порошке имеют размер от 20 до 100 нм, что позволяет характеризовать получившийся продукт как наноразмерный с достаточно высокой степенью чистоты.

Таким образом, фазовый состав полученного порошка и распределение его частиц по размеру является удовлетворительным и позволяет использовать его в дальнейшем для спекания керамических образцов.

#### **Изготовление керамических образцов**

Для изготовления керамики было взято две одинаковые порции коммерческого порошка AlN марки ТЧ-1 без предварительной подготовки. В одну из них была произведена совместная добавка нанодисперсной фракции порошка нитрида алюминия в количестве 5 % масс и микронного порошка оксида иттрия в таком же количестве (образец 2), а другая порция осталась неизменной (образец 1). Спекание двух образцов осуществлялось в SPS-установке при температурах 1800°C в вакууме. Образец помещался в графитовую пресс-форму (рисунок 3.5) диаметром 20 мм и предварительно прессовался давлением до 20 МПа. Во обоих случаях скорость нагрева образцов была установлена 500°C/мин. С указанной скоростью образец нагревался до температур спекания. После этого давление на образцы росло до 60 МПа в течение 1 минуты, и еще одну минуту они выдерживались при этом давлении. После этого выключался источник питания пресса, происходило снижение температуры с последующим снятием и давления прессования.

После полного охлаждения и выемки образца из пресс-формы проводилась оценка плотности методом гидростатического взвешивания. Оценка плотности показала, что образец 1 имеет относительную плотность (82,2%) гораздо меньшую, чем плотность образца 2 (98,5 %), а измерение теплопроводности об-

разцов проводилось методом лазерной вспышки на приборе Discovery DLF-1 и показало, что значение теплопроводности второго образца (160,15 Вт/м·К) почти в 3 раза превосходит теплопроводность первого образца (55,24 Вт/м·К).

### **Заключение**

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что совместная добавка нанопорошка AlN, полученного методом плазмодинамического синтеза, и микронного порошка Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в одинаковых порциях (5 % масс.) к основному коммерческому порошку нитрида алюминия марки ТЧ 1 позволила увеличить относительную плотность керамического образца на 16,3 % и почти в 3 раза повысить его теплопроводность.

### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. S Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, №1. – С. 17-22
2. Wang, X., Wang, R., Peng, C., Li, T., Liu, B. Synthesis and sintering of beryllium oxide nanoparticles // Journal of Progress in Natural Science: Materials International. – 2010. – Vol. 20. – pp. 81–86.
3. Pee J.H., Park J.C., Hwang K.T., Kim S., Cho W.S. Properties of AlN powder synthesized by self-propagating high temperature synthesis process // Key engineering materials. – 2010. – № 434–435. – P. 834–837.
4. Sivkov A.A., Saigash A.S., Kolganova Yu.L. The research of copper coatings properties obtained by plasmodynamic method // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 12-3. С. 138-141.

Научный руководитель: А.А. Сивков, д.т.н., профессор каф. ЭПП ЭНИН ТПУ.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ СТЕРЖНЯ**

М.А. Вергаскина, Л.С. Головина, И.А. Нечупей  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТЭС, группа 5032

Рассмотрим подгруппу методов с осевым, продольным потоком тепла. Наиболее простым, с принципиальной точки зрения, является эксперимент в условиях, когда распределение температуры в образце одномерно, т.е. когда поток тепла в каждой точке образца направлен строго по оси симметрии. Такие условия будут созданы в случае, когда боковая поверхность образца, представляющего собой цилиндр или параллелепипед, теплоизолирована. Теплопроводность при этом определяется по формуле (1), где  $Q$  – количество тепла, проходящее через сечение  $S$  в единицу времени,  $\Delta T$  – разность температур в точках стержня, находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга.