

**КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ,
МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ОДНОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ
НАНОТРУБКАМИ***А.А. ЛЕОНОВ, З.Г. БИКБАЕВА*

Томский политехнический университет

E-mail: laa91@tpu.ru

Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) привлекают международный научный интерес благодаря своему уникальному сочетанию механических (модуль Юнга ~ 1 ТПа и прочность на растяжение до 60 ГПа), электрических (максимальная электропроводность при 300 К $\sim 10^6$ Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$) и тепловых свойств (максимальная теплопроводность 6600 Вт/(м·К)), а также термической стабильности до 2000–2400 °С в атмосфере аргона или в вакууме, низкой плотности, гибкости и высокому соотношению сторон (10^3 – 10^8). ОУНТ рассматриваются как перспективный упрочняющий агент для хрупких керамических матриц, что приводит к созданию новых конструкционных керамоматричных композитов с улучшенными механическими характеристиками, а также со специфическими тепловыми и электрическими свойствами. В работе [1] было показано, что при добавлении 10 об.% ОУНТ в матрицу Al_2O_3 позволяет повысить трещиностойкость до 9,7 МПа·м $^{1/2}$, что почти в три раза выше, чем у оксида алюминия. Yamamoto и др. [2] установили, что композит на основе Al_2O_3 с 0,9 об.% многостенных УНТ обладает повышенной прочностью на изгиб (689,6 МПа) и трещиностойкостью (5,9 МПа·м $^{1/2}$), что выше на 27% и 25%, соответственно, по сравнению с керамикой Al_2O_3 . Цель работы: получение композитов Al_2O_3 /ОУНТ электроимпульсным плазменным спеканием и проанализировать влияние нанотрубок на физико-механические свойства композитов.

В настоящей работе в качестве матричной основы использовали порошок оксида алюминия с добавкой нанопорошка того же состава в количестве 6%. В качестве наполнителя использовали ОУНТ «Tuball» производства OCSiAl (Новосибирск, Россия). Смешивание исходных компонентов производили в среде этилового спирта по методике, описанной в работе [3]. Относительное содержание ОУНТ в композиционном порошке составляло 3 об.%. Керамику Al_2O_3 и композиты Al_2O_3 /ОУНТ синтезировали электроимпульсным плазменным спеканием (Spark plasma sintering) при следующих условиях: давление прессования – 40 МПа, температура спекания – 1500 °С и 1600 °С, скорость нагрева – 100 °С/мин, время изотермической выдержки – 10 мин. Такой режим спекания был выбран с учетом предыдущих исследований [4, 5]. Гидростатическим взвешиванием определялась плотность полученных образцов. Микротвердость (H_V) и трещиностойкость (K_{IC}) определялись на приборе ПМТ-3М с использованием алмазной пирамидки Виккерса (нагрузка 4,9 Н). Коэффициент K_{IC} оценивался по методу Anstis.

На рис. 1а представлено СЭМ изображение полученного композиционного порошка, из которого видно, что он состоит из частиц сферической или близкой к ней формы, также присутствуют частицы неправильной геометрической формы. Кроме того видно, что ОУНТ достаточно хорошо диспергированы и имеют гибкую структуру, что позволяет им изгибаться и опутывать частицы Al_2O_3 , образуя сетчатые каркасы. Распределение частиц по размерам исследуемого порошка имеет полимодальный вид (рис. 1б) и укладывается в диапазон от 0,1 мкм до 9 мкм. Средний объемно-весовой диаметр частиц порошка Al_2O_3 составляет 1,71 мкм. Из таблицы 1 видно, что увеличение температуры спекания керамики Al_2O_3 до 1600 °С не приводит к повышению относительной плотности, она оставалась практически одинаковой для обоих образцов и составляла > 97%. У композитов относительная плотность ($\sim 96\%$) была несколько ниже, чем у Al_2O_3 . Возможно, это связано с присутствием агломератов ОУНТ в композитах, что приводит к пористости. Микротвердость композитов (16,6 ГПа) ниже, чем у керамики Al_2O_3 (~ 18 ГПа), это объясняется тем, что ОУНТ имеют более низкую твердость, чем оксид алюминия и

армирующая фаза обычно создает в кристаллах матрицы и на их границах растягивающие напряжения. Кроме того, H_V коррелируют с плотностью материала, которая у композитов была снижена. Трещиностойкость композита спеченного при 1500 °С выше, чем у керамики Al_2O_3 спеченной при 1500 °С и 1600 °С на 6% и 14%, соответственно. Повышение K_{IC} связано с тем, что ОУНТ образуют достаточно плотные сетчатые каркасы на зернах матрицы, что приводит к поглощению энергии распространяющейся трещины.

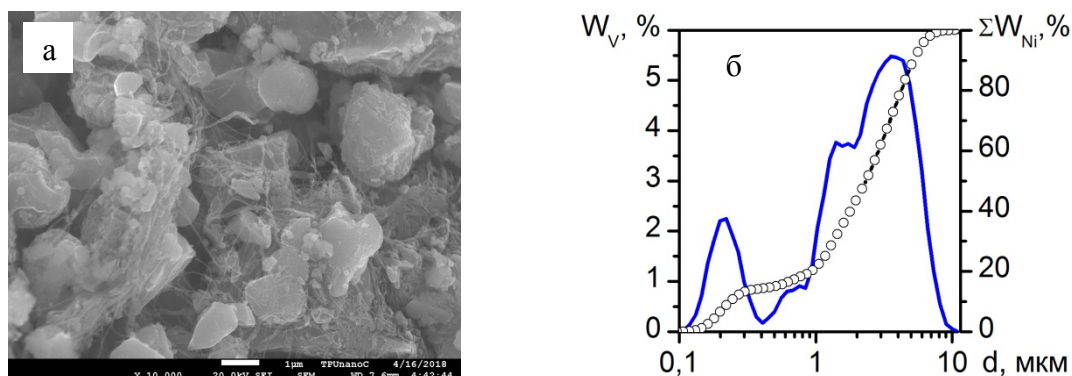


Рисунок 1 - а) СЭМ изображение композиционного порошка Al_2O_3 /ОУНТ (JSM-7500FA); б) объемное распределение частиц по размерам и кумулятивная кривая (SALD-7101)

Таблица 1 – Свойства исследуемых образцов

Образец	$\rho_{отн.}$, %	H_V , ГПа	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
Al_2O_3 -1500	97,43	18,40 ± 0,90	4,65 ± 0,36
Al_2O_3 -1600	97,20	17,64 ± 0,77	4,34 ± 0,35
Al_2O_3 /ОУНТ-1500	95,91	16,58 ± 2,44	4,94 ± 0,37
Al_2O_3 /ОУНТ-1600	96,10	16,60 ± 1,58	3,95 ± 0,91

Для того чтобы существенно улучшить механические свойства композитов Al_2O_3 /ОУНТ требуется более однородное распределение нанотрубок в матрице, повышение относительной плотности спеченных композитов и увеличение относительного содержания ОУНТ в композитах.

Список литературы

- Zhan G.D., et al. Single-wall carbon nanotubes as attractive toughening agents in alumina-based nanocomposites // Nature Materials. – 2003. – V.2. – P. 38–42.
- Yamamoto G., et al. A novel structure for carbon nanotube reinforced alumina composites with improved mechanical properties // Nanotechnology. – 2008. – V.19. – P. 315708.
- Леонов А.А. и др. Структура и свойства керамических композитов ZrO_2 , модифицированных различными армирующими наполнителями // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 7 т., г. Томск, 24-27 апреля 2018. – Томск: Изд. дом ТГУ, 2018 – Т.1. Физика. – С. 180–182.
- Leonov A.A., et al. Spark plasma sintering of ceramic matrix composite based on alumina, reinforced by carbon nanotubes // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2017. – V.286. – P. 012034.
- Леонов А.А. Влияние температуры спекания на микроструктуру и свойства композита на основе корунда, модифицированного многостенными углеродными нанотрубками // Химическая технология функциональных наноматериалов: сборник материалов международной конференции со школой и мастер-классами для молодых ученых, Москва, 30 Ноября-1 Декабря 2017. – Москва: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017 – С. 145–147.