

агрегативную устойчивость (рис. 1). Установлено, что скорость оседания частиц УНТ с концентрацией 1 г/л в рассматриваемых условиях максимальна, т.е. наиболее быстро начинают агрегировать (фиксируется визуально) и оседать частицы УНТ на дно цилиндра. Время оседания частиц в суспензии при данной концентрации, приготовленных при температурах диспергирования 25 °С, 40 °С, 50 °С, составляет 20, 14 и 9 мин., соответственно.

В ходе эксперимента определена концентрация наиболее агрегативно устойчивой суспензии. Она составляет 0,25 г/л. В этом случае время оседания частиц УНТ в суспензии, приготовленных при температурах диспергирова-

ния 25 °С, 40 °С, 50 °С, составляет 180, 130 и 100 мин, соответственно. Также из рис. 1 следует, что оптимальная температура диспергирования суспензий УНТ составляет 25 °С.

Таким образом, в суспензиях с высокой концентрацией УНТ и приготовленных при высоких температурах диспергирования наблюдается ускорение процессов агрегирования и седиментации наночастиц, т.е. в суспензии протекает быстрая коагуляция, которая оказывает отрицательное действие на свойства УНТ. Для получения устойчивых суспензий УНТ рекомендуется использовать УНТ с концентрацией 0,25–0,5 г/л и проводить диспергирование при температуре, не превышающей 25 °С.

### Список литературы

1. Козлова И.В. Структурные модели и механизм влияния стабилизированных суспензий нано- и ультрадисперсных добавок на свойства цементных композиций. Автореферат дисс. ... к.т.н.– Москва: Моск. гос. строит. ун-т, 2017.– 24с.
2. Пудов И.А., Яковлев Г.И., Лушикова А.А., Изряднова О.В. Гидродинамический способ диспергации многослойных углеродных нанотрубок при модификации минеральных вяжущих // Интеллектуальные системы в производстве, 2011.– №1(17).– С.285–293.

## ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ ОДНОСТЕННЫХ УНТ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

А.А. Леонов, В.Д. Пайгин, В.А. Цуканов  
Научный руководитель – д.т.н., профессор О.Л. Хасанов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина 30, laa91@tpu.ru

Диоксид циркония ( $ZrO_2$ ) стабилизированный оксидом иттрия, является перспективным функциональным и конструкционным материалом. Он обладает высокой термо- и коррозионной стойкостью, высокими механическими свойствами, является биологически инертным материалом. Несмотря на перечисленные выше достоинства диоксида циркония, как и многие другие керамические материалы, он весьма хрупкий и обладает низкой вязкостью разрушения, поэтому области его применения ограничены. Одним из эффективных способов улучшения механических свойств, является армирование керамики углеродными нанотрубками (УНТ), введение которых приводит к существенному повышению механических свойств, в том числе к увеличению вязкости разрушения керамиче-

ского материала. Целью данной работы является исследование влияния относительного содержания УНТ на механические свойства композитов  $ZrO_2$ .

Для создания композитов в качестве матричной основы использовали нанопорошок кубического диоксида циркония (TZ-8YS) стабилизированного 8 мол. % оксида иттрия (Tosoh Corp., Япония). Одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ) «Tuball» (OCSiAl, Россия) использовали в качестве армирующих добавок. Относительное содержание ОУНТ в композитах составляло 0,1; 0,5 и 1 мас.%. Смешивание нанопорошка  $ZrO_2$  и ОУНТ производили по методике, описанной в работе [1]. Электроимпульсное плазменное спекание порошковых смесей с ОУНТ и нанопорошка  $ZrO_2$  осуществляли на установке

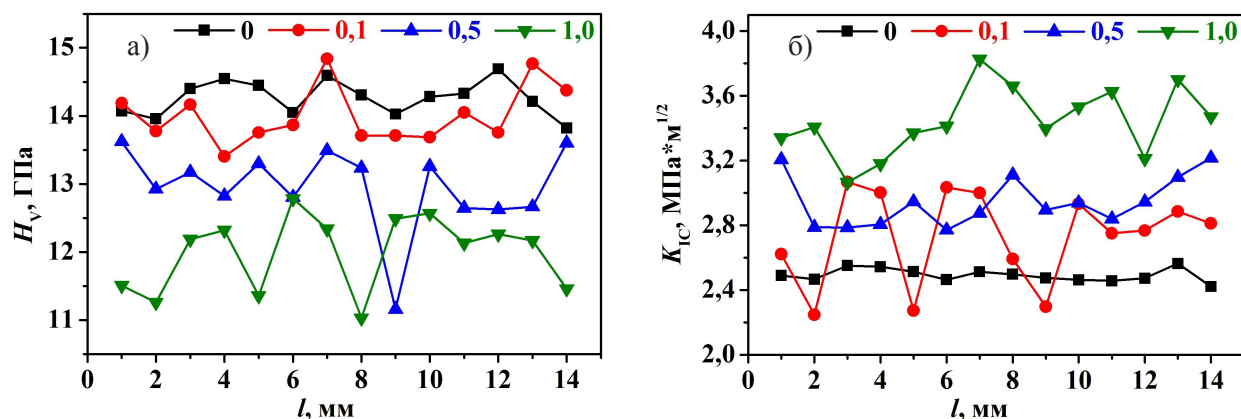


Рис. 1. Распределение микротвердости (а) и трещиностойкости (б) по диаметру образцов

SPS 515S. Плотность образцов определяли геометрическим методом. Микротвердость ( $H_V$ ) и трещиностойкость ( $K_{1C}$ ) образцов определяли на приборе ПМТ-3М методом индентирования алмазной пирамидки Виккерса при нагрузке 4,9 Н.

Для того чтобы корректно оценить микротвердость и трещиностойкость полученных образцов, отпечатки алмазной пирамидки наносили по диаметру образца с шагом 1 мм. Из рис. 1а видно, что наиболее однородное распределение значений микротвердости наблюдается для неармированного образца керамики. Повышение относительное содержание ОУНТ от 0 до 1 мас. % в образцах, увеличивает степень анизотропии микротвердости (табл. 1). Объясняется это тем, что некоторые уколы индентирования попадают в области, где присутствуют пучки/агломераты нанотрубок.

Для неармированной керамики, значения трещиностойкости (рис. 1б) практически одинаковы в любой точке индентирования, стандартное отклонение значений  $K_{1C}$ , составляет всего 0,04. Стоит отметить, что для образца с 0,1 мас. % преобладающее большинство значений  $K_{1C}$  находятся на уровне значений для образца с 0,5 мас. % ОУНТ. Из этого следует, что

Таблица 1. Свойства исследуемых образцов

Содержание ОУНТ, мас. %	$\rho_{\text{отн}}, \%$	$(H_V)_{\text{ср}}, \text{ГПа}$	$(K_{1C})_{\text{ср}}, \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$
0	99,01	$14,27 \pm 0,25$	$2,49 \pm 0,04$
0,1	98,20	$14,00 \pm 0,41$	$2,73 \pm 0,28$
0,5	98,01	$12,95 \pm 0,60$	$2,94 \pm 0,15$
1,0	97,95	$11,99 \pm 0,53$	$3,44 \pm 0,20$

если улучшить диспергирование УНТ, то можно достигнуть значительного повышения трещиностойкости при малых массовых включениях ОУНТ, это является актуальным, т.к. при более высоком (1 мас. %) содержании наблюдается уменьшение микротвердости с 14,27 ГПа до 11,99 ГПа.

Выводы. Электроимпульсным плазменным спеканием получены высокоплотные (98–99%) образцы керамики. Проанализировано влияние ОУНТ на механические свойства композитов. Установлено, что для композита с 1 мас. % ОУНТ, наблюдается увеличение трещиностойкости на 38%.

Исследование выполнено на базе «Нано-Центра» НИ ТПУ при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-33-00763 мол\_а.

## Список литературы

1. Леонов А.А. // Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XIX Международной научно-практической конференции сту-

дентов и молодых ученых, Томск, 21–24 Мая 2018.– Томск: ТПУ, 2018.– С.90–91.