

кристаллизации. Была рассчитана термическая стабильность стекол как разница между температурой начала пика кристаллизации и  $T_g$ . Уста-

новлено, что она уменьшается с ростом содержания  $x$ .

### Список литературы

1. Curcio A. et al. *Ultrafast crystallization and sintering of  $Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO_4)_3$  glass and its impact on ion conduction* // *ACS Applied Energy Materials*, 2022. – V. 5. – № 11. – P. 14466–14475.
2. Pershina S. V. et al. *Solid Electrolyte Membranes Based on  $Li_2O-Al_2O_3-GeO_2-SiO_2-P_2O_5$*  // *Glasses for All-Solid State Batteries // Membranes*, 2022. – V. 12. – № 12. – P. 1245.
3. Vu N. H. et al. *Effects of excess Li on the structure and electrochemical performance of  $Li_{1+z}MnTiO_{4+\delta}$  cathode for Li-ion batteries* // *Electrochimica Acta*, 2017. – V. 225. – P. 458–466.

## МОДУЛЬ ЮНГА КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ «ГИДРОКСИАПАТИТ-МНОГОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ»

А. Е. Резванова<sup>1</sup>, А. Н. Пономарев<sup>1</sup>, Б. С. Кудряшов<sup>1,2</sup>  
Научный руководитель – к.ф.-м.н., с.н.с. А. Н. Пономарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
634055, Россия, Томск, Академический пр., 2/4, ranast@ispms.ru, alex@ispms.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, Томск, пр. Ленина 30, bsk3@tpu.ru

В настоящее время при создании имплантатов костной ткани большое внимание привлекает гидроксиапатит (ГА) благодаря биосовместимости, остеокондуктивности, биоактивности и высокому химическому сходству с натуральной костью. Однако его применение ограничено из-за хрупкости и низкой трещиностойкости [1], что не позволяет использовать такой материал в местах интеграции имплантата с высокими механическими нагрузками. Улучшение механических свойств ГА может быть реализовано за счет использования упрочняющих добавок, таких как многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ). Их гибкость, низкая плотность, высокий модуль Юнга и вязкость разрушения позволяют использовать малое количество (< 1 масс %) для повышения механических свойств композитов, чтобы предотвратить или замедлить инициирование и распространение трещины в биокомпозите [2]. В работе получен композитный материал гидроксиапатит-многостенные углеродные нанотрубки (ГА-МУНТ) для медицинских применений. Концентрации МУНТ варьировались в диапазоне 0,05–0,5 масс. %.

На рисунке 1 представлены результаты измерения модуля Юнга композита в зависимости от концентрации МУНТ.

Красные кружки показывают расчетный модуль Юнга для каждого из шести испытаний на вдавливание в каждом образце. Средние значения представлены незаштрихованными квадратными символами. Черной линией отмечен средний модуль Юнга для ГА керамики без добавок МУНТ. Литературные значения для эмали [3] (зеленая линия) и для соединения дентин-эмаль (оранжевая линия) приведены для сравнения. Существенной разницы между модулем Юнга спеченных композитов ГА-МУНТ и керами-

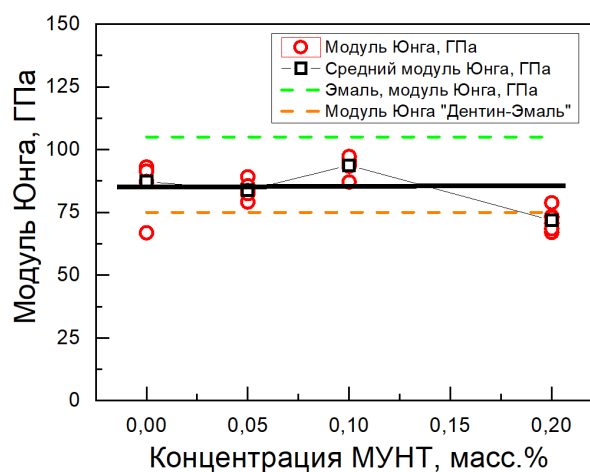


Рис. 1. Зависимость модуля Юнга от концентрации МУНТ

ки ГА без добавок МУНТ не наблюдается. В то же время модуль Юнга спеченных композитов сравним с модулем Юнга эмали. Снижение модуля Юнга керамики может быть связано с присутствием МУНТ большого диаметра и неоднородного распределения МУНТ в образцах. Модуль Юнга МУНТ также зависит от диаметра нанотрубок и может варьироваться от ~1000 ГПа (для трубок диаметром 7 нм) до ~10 ГПа (диаметр более 40 нм) [4]. Увеличение модуля упругости композита ГА–МУНТ можно объяснить тремя основными факторами: (i) высоким значением модуля Юнга МУНТ малого диаметра; (ii) уменьшением пористости матрицы ГА с увеличением добавок МУНТ и (iii) прочной поверхностью раздела ГА–МУНТ. Увеличение концентрации МУНТ приводит к росту модуля Юнга за счет снижения пористости ГА. С другой стороны, морфология агломератов МУНТ

существенно изменяется в керамике за счет частичного окисления нанотрубок в процессе спекания. Это может привести к снижению модуля Юнга композитной керамики ГА–МУНТ. Таким образом, компенсация факторов с противоположным действием в образце приводит к слабому изменению модуля Юнга при увеличении концентрации МУНТ. Это согласуется с литературными данными, где наблюдалось как небольшое увеличение, так и уменьшение модуля Юнга керамики при добавлении МУНТ [5]. Таким образом, значения модуля Юнга спеченного композита ГА–МУНТ незначительно изменяются при варьировании концентраций нанотрубок и близки к эмали (75–100 ГПа).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема № FWRW-2022-0002.

### Список литературы

1. Zhao X., et al. // *Preparation of silicon coated-carbon fiber reinforced HA bio-ceramics for application of load-bearing bone / Ceramics International*, 2020. – V. 46. – P. 7903–7911.
2. Khalid P., Suman V. B. // *Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composite for Bone Tissue Engineering and Their Interaction with Mouse Fibroblast L929 In Vitro / Journal of Bionanoscience*, 2017. – V. 1. – P. 233–240.
3. Wang Z., et al. // *Mapping the mechanical gradient of human dentin-enamel-junction at different intratooth locations / Dental Materials*, 2018. – V. 34. – P. 376–388.
4. Elumeeva K. V., et al. // *Reinforcement of CVD grown multi-walled carbon nanotubes by high temperature annealing / AIP Advances*, 2013. – V. 3. – P. 112101.
5. Kalmodia S. // *Microstructure, mechanical properties, and in vitro biocompatibility of spark plasma sintered hydroxyapatite–aluminum oxide–carbon nanotube composite. Materials Science and Engineering C*, 2010. – V. 30. – P. 1162–1169.

## СИНТЕЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ $\text{AlOOH}@ZnO/Ag$ С ВЫСОКОЙ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

А. О. Речкунова<sup>1</sup>, А. М. Волков<sup>2</sup>

Научный руководитель – д.т.н., заведующий лабораторией М. И. Лернер<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
634055, Россия, г. Томск, пр. Академический, 2/4

<sup>2</sup>Сибирский государственный медицинский университет  
634050, Россия, г. Томск, Московский тракт, 2

В настоящее время существует потребность в создании новых высокоэффективных наноматериалов с антимикробной активностью, низкой токсичностью, а также не вызывающих образование резистентных штаммов. Одними из наи-

более перспективных материалов для решения данной проблемы являются композитные наноструктуры на основе пористого  $\text{AlOOH}$ . Наличие наночастиц  $\text{AlOOH}$  в составе композита способствует адсорбционному взаимодействию