

2. Голубчик Э.М, Копцева Н.В, Чукин Д.М., Ефимова Ю.Ю и др. Возможности применения высокопрочных инварных сплавов нового поколения // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – том 1. – 2015. – с.342-345
3. J. Hidalgo, A. Jiménez-Morales, T. Barriere, J. C. Gelin & J. M. Torralba. Mechanical and functional properties of Invar alloy for  $\mu$ -MIM // Powder Metallurgy. – 2014. – vol 57. – №2. – p. 127–136.

## ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЯ КЕРАМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

*В.Д. ПАЙГИН, А.А. ЛЕОНОВ, Т.Р. АЛИШИН, О.С. ТОЛКАЧЁВ*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: vpaygin@mail.ru

**Введение.** Развитие современной науки и техники требует создания новых высокоэффективных материалов эксплуатация которых, возможна при температурах от 1200 до 2000 °С в условиях повышенной механической нагрузки. К таким материалам относится техническая керамика, обладающая высокими механическими характеристиками, термодинамической стабильностью, инертностью по отношению к воздействиям многих химически агрессивных сред и широким диапазоном изменения теплофизических свойств в зависимости от состава. Однако использование этих преимуществ не всегда возможно, в силу высокой хрупкости керамических материалов, обусловленной особенностями ионно-ковалентного типа межатомных связей. Одним из вариантов решения этой проблемы является создание керамоматричных композиционных материалов (ККМ), армированных дискретными или непрерывными волокнами. Вероятность разрушения ККМ в процессе нагружения высока существенно ниже, чем у её неармированных аналогов. Деформация в композиционных материалах проходит нелинейно, что сохраняет несущую способность. ККМ успешно применяются в авиационной и космической технике, двигателестроении, приборостроении, обрабатывающей и военной промышленности [1-2]. Перспективным матричным материалом для изготовления ККМ является частично стабилизированный диоксид циркония, а наполнителем - нановолокна оксида алюминия, что обусловлено их уникальными физико-механическими свойствами [3].

В настоящей работе проведено исследование динамики линейной усадки ККМ на основе диоксида циркония армированного нановолокнами оксида алюминия.

**Материал и методики экспериментов.** В качестве матричного материала был использован нанопорошок диоксида циркония частично стабилизированного 3 мол. % оксида иттрия (TZ-3YS, Tosoh Corp., Япония), в качестве наполнителя - нановолокна оксида алюминия (OCSiAl, Россия). Подготовку композиционных смесей с содержанием 1; 5 и 10 мас. %  $Al_2O_3$  осуществляли в этаноле, при помощи ультразвуковой ванны ГРАД 28-35 (Град-Технолоджи, Россия). Консолидацию порошковых смесей осуществляли методом электроимпульсного плазменного спекания на установке SPS-515S (SPS SYNTEX INC., Япония) в вакууме при температуре 1500 °С и давлении 40 МПа. Изменение линейных размеров керамического материала в процессе спекания регистрировалось встроенными средствами технологического оборудования. Плотность образцов была определена измерением массы и линейных размеров. Исследование микроструктуры ККМ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM 7500FA (JEOL, Япония).

**Результаты исследования и их обсуждение.** Основные характеристики изготовленных образцов представлены в таблице.

Таблица 1 - Характеристики образцов ККМ

Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мас. %	$\rho$ , %	Отн. усадка, %
0	98,29	56,69
1	99,84	54,85
5	99,15	58,86
10	98,67	58,81

Усадочная кривая спекаемого ККМ носит одностадийный характер (рисунок 1). Основная доля усадки приходится на неизотермическую стадию нагрева в диапазоне температур 1025 – 1440 °С. Видно, что интенсивная стадия уплотнения с увеличением содержания нановолокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> смещается на  $\approx$  50-100 °С в область меньших температур.

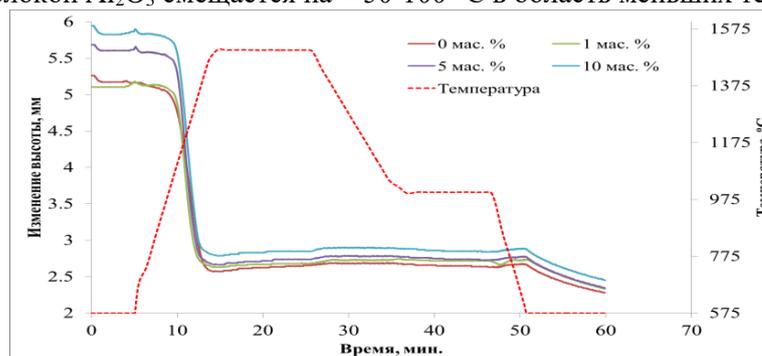


Рисунок 1 - Динамика линейной усадки PSZ-керамики армированной 1 - 10 мас. % нановолокнами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Характер разрушения керамики – транскристаллитный, свидетельствующий о высокой прочности межзеренных границ. На полученных изображениях (рисунок 2) присутствуют как отдельные волокна Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, так и их агломераты в виде пучков, наличие которых может оказывать негативное влияние на эксплуатационные свойства ККМ. В связи с этим целесообразным является оптимизация методов диспергирования и смешивания исходных компонентов композитов.

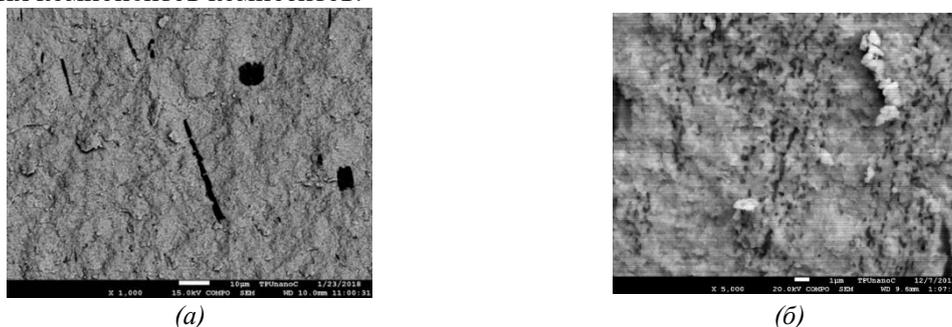


Рисунок 2 - Типовое СЭМ-изображение поверхности скола PSZ-керамики армированной нановолокнами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: (а) 1 мас. %; (б) 10 мас. %

**Заключение.** Получены образцы ККМ на основе PSZ. Изучена динамика линейной усадки ККМ с содержанием наполнителя от 1 до 10 мас. %. Установлено, что интенсивная стадия уплотнения с увеличением содержания нановолокон Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> смещается на  $\approx$  50-100 °С в область меньших температур.

*Исследование выполнено на базе «Нано-Центра» НИ ТПУ, при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-33-00763 мол\_а. и ГЗ «Наука» № 11.7700.2017/БЧ. Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Двилису Э.С. за обсуждение полученных результатов и ценные рекомендации.*

### Список литературы

1. Тростянская Е.Б., Михайлин Ю.А., Бухаров С.В. Тенденции применения и развития композиционных материалов в самолетостроении // *Авиационная промышленность*. 2002. №2.
2. Милейко С.Т. Композиты и наноструктуры // *Композиты и наноструктуры*. 2009. №1. С.6-37
3. Riggs, J. E. Optical limiting properties of suspended and solubilized carbon nanotubes / J. E. Riggs, D. B. Walker, D. L. Carroll [et al.] // *J. Phys. Chem. B*. — 2000. — Vol. 104, № 30. — P. 7071–7076.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНАЦИИ МАТЕРИАЛОВ НА УГОЛ КРУЧЕНИЯ ПРОДОЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ КПЭ ВЕРТОЛЕТНОЙ ЛОПАСТИ ОСНАЩЕННОЙ ПЬЕЗОАКТУАТОРАМИ

*А.Н. АНОШКИН<sup>1</sup>, П.В. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, В.А. АШИХМИН<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: [pisarev85@live.ru](mailto:pisarev85@live.ru)

Применения SMART конструкций с управляемой геометрией является тенденцией в авиационной технике в настоящее время. Это позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики воздушных судов за счет снижения виброакустической нагруженности высоконагруженных элементов, таких как крыло самолета или вертолетные лопасти [1]. Разработка SMART конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), оснащенных пьезоэлементами с одной стороны позволят снизить вес конструкции, а с другой стороны позволят исключить механические приводы и автоматы перекося, что существенно сократит стоимость обслуживания конструкций с управляемой геометрией и расход топлива воздушных судов.

С наибольшей эффективностью SMART конструкции могут применяться при создании авиационных крыльев с изменяемой геометрией, что позволит оптимально приспособиваться к аэродинамическим параметрам воздушного потока [2]. Рассматривается применение SMART-технологий к демпфированию колебаний лопастями вертолета, рисунок 1. В настоящее время рассматривается возможность применения SMART-технологий при создании лопаток вентилятора и спрямляющего аппарата авиационного двигателя [3].



а



б

Рисунок 1 - Примеры применения SMART конструкций (а) профиль крыла самолета с изменяемой геометрией (б) вертолетная лопасть с изменяемой геометрией

В настоящее время известны некоторые работы, описывающие теоретические основы создания SMART конструкций из ПКМ с управляемой геометрией [4,5]. Разработаны численные модели поперечного сечения лопасти и для выявления ее оптимальной конфигурации проведены параметрические исследования относительной жесткости управляемой конструкции оснащенной AFC актуаторами.