

## Список литературы

1. Panov M. S. et al. // *High rate in situ laser-induced synthesis of copper nanostructures performed from solutions containing potassium bromate and ethanol*. *Microelectron. Eng.* 157, 2016.
2. Yang Z. // *Natural Deep Eutectic Solvents and Their Applications in Biotechnology*, 2018. – P. 31–59.
3. Levshakova A. S. et al. // *Highly rapid direct laser fabrication of Ni micropatterns for enzyme-free sensing applications using deep eutectic solvent*. *Mater. Lett.* 308, 2022.
4. Levshakova A. S. et al. // *Modification of nickel micropatterns for sensor-active applications from deep eutectic solvents*. *Optical and Quantum Electronics* 55, 267, 2023.

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭИПС КЕРАМИКИ ATZ НА УПЛОТНЕНИЕ И СТРУКТУРУ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

Ц. Ли, О. С. Толкачев, Х. Хи, Ц. Ху

Научный руководитель – д.т.н., профессор О. Л. Хасанов

Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, czin1@tpu.ru

Керамика Y-TZP используется в различных продуктах для многих спектра применений. Предел прочности на изгиб этой керамики составляет 1,2 ГПа. Однако для Y-TZP характерна трансформация тетрагональной фазы в моноклинную во влажной среде и при высоких температурах. Это воздействие вызывает повреждение и хрупкости керамики. В меньшей степени этот дефект наблюдается при добавлении в керамику  $Al_2O_3$ . Добавление 20 мас. %  $Al_2O_3$  приводит к 60 % упрочнению керамики и прочностью на изгиб 2 ГПа (ATZ, оксид циркония, армированный оксидом алюминия). Одним методом получения керамики на основе ATZ является электроимпульсное плазменное спекание (ЭИПС). Наиболее очевидным недостатком ЭИПС является сложность получения изделий сложной формы.

Из ATZ можно предварительно спекать для изготовления изделий сложной формы. бразцы были предварительно спечены для достижения необходимой прочности. Окончательное спекание осуществляется после измельчения, из которого получают необходимую плотность и прочность.

Целью данной работы является изучение влияния предварительного ЭИПС на кинетику

**Таблица 1.** Относительная плотность образцов после свободного спекания при 1500 °С

Выдержка, ч.	0 ч.	2 ч.	6 ч.
После прессования	94,4 %	98,4 %	98,6 %
После ЭИПС	97,2 %	99,1 %	99,6 %

последующего изотермического уплотнения при свободном спекании.

В качестве материала исследования использовали порошок ATZ марки TZ-3YS20AB (Tosoh). По данным производителя порошок содержит Y-TZP и 20 мас. %  $Al_2O_3$ .

Относительная плотность образцов, изготовленных по схеме одноосного одностороннего прессования в стальной цилиндрической форме при давлении 75 МПа, составляет 47 %. ЭИПС при 1100 °С в течение 1 мин. и давление 75 МПа приводит к уплотнению ATZ до 61 %. Образцы после ЭИПС обладают большей плотностью, что позволяет снизить температуру и/или выдержку при свободном спекании. Относительная плотность превышает 99 % уже после 2 ч. выдержки при 1500 °С (таблица 1).

При изучении структуры поверхности образцов методами СЭМ после свободного спекания на воздухе при 1500 °С в течение 2 ч. было установлено, что образец без предварительного

**Таблица 2.** Средний размер зерен в изготовленных образцах после 2 ч. свободного спекания при 1500 °С

Способ	Материал	Размер зерна, (нм)	Стандартное отклонение (нм)
Одноосное прессование	Y-TZP	392	127
	$Al_2O_3$	407	141
ЭИПС	Y-TZP	335	124
	$Al_2O_3$	384	141

спекания содержит поры размером до ~50 мкм. Эти поры располагаются преимущественно в месте контакта отдельных гранул исходного порошка. Однако в случае предварительного ЭИПС крупных пор в образце обнаружено не было. Средний размер зерна исследованных образцов близок и составляет ~350 нм для Y-TZP и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (таблица 2).

Таким образом, предварительное ЭИПС существенно влияет на кинетику последующе-

го изотермического уплотнения при 1500 °С. Обращает на себя внимание эффект снижения необходимой изотермической выдержки без заметного роста зерен Y-TZP и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта № FSWW-2023-0011 государственного задания «Наука» России. Настоящее исследование выполнено на оборудовании ЦКП НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.

### Список литературы

1. S. Ramesh, K. Y. Sara Lee, and C. Y. Tan. // *Ceram. Int.*, 2018. – V. 44. – P. 20620.

## ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНОГО КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ZrO<sub>2</sub> И MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Ли Шухуэй, Д. Е. Деулина, В. Д. Пайгин

Научный руководитель – д.т.н., профессор ОМ ИШНПТ О. Л. Хасанов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, shuhuey1@tpu.ru

По мере быстрого развития современной оптической техники, возрастает потребность в оптических материалах, обладающих уникальными свойствами. К таким материалам можно отнести функционально-градиентные материалы в целом и функционально-градиентную керамику (ФГК) в частности.

Перспективными материалами для изготовления ФГК оптического назначения являются диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия (ZrO<sub>2</sub>(10%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)) и алюмомагниева шпинель (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), что обусловлено их высокими оптико-люминесцентными и физико-механическими характеристиками [1, 2].

Целью настоящей работы является изготовление функционально-градиентных керамик на основе MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и ZrO<sub>2</sub>(10%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) методом электроимпульсного плазменного спекания.

В качестве исходных материалов были использованы коммерческие нанопорошки алюмомагниева шпинели (SC30R, Baikowski Malakoff Inc., США) и диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (TZ-10YS, Tosoh Corp., Япония). Электроимпульсное плазменное спекание проводили на установке SPS-515S (Syntex Inc., Япония).

Изменение линейных размеров регистрировали встроенными средствами технологической установки. На основе полученных данных опре-

деляли относительную усадку образцов (рисунок 1).

Усадка исследуемых материалов носит одностадийный характер. Основная доля усадки приходится на неизотермическую стадию спекания. Снижения интенсивности уплотнения при температуре 1000 °С связано с технологическим режимом консолидации материалов и обусловлено промежуточной стадией изотермической выдержки.

Интенсивная усадка алюмомагниева шпинели наблюдается в диапазоне температур от 1100 до 1450 °С. Интенсивная усадка диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия наблюдается в диапазоне температур от 1000 до 1300 °С. Для смеси порошков и функционально-градиентного материала температуры интенсивной усадки несколько выше, чем у диоксида циркония, однако ниже, чем у алюмомагниева шпинели.

В таблице 1 представлены значения относительной усадки и относительной плотности образцов.

Из данных таблицы можно сделать вывод, что относительная плотность градиентной керамики на основе шпинели и иттрий-стабилизированного диоксида циркония, является самой высокой.