

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТВЕРДОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ

*Д.Е. ДЕУЛИНА, В.Д. ПАЙГИН, И. Н. ШЕВЧЕНКО, А. Э. ИЛЕЛА*

Томский политехнический университет

E-mail: [ded5@tpu.ru](mailto:ded5@tpu.ru)

В настоящее время оптически прозрачная керамика на основе алюмомагниевои шпинели ( $MgAl_2O_4$ , АМШ) представляет собой материал, представляющий интерес для научных исследований и перспективный для применения в промышленности. Из АМШ могут быть изготовлены защитные окна, головные обтекатели ракет, прозрачная броня. Весьма широкий спектр применения такой керамики обусловлен комплексом её уникальных свойств: высокая температура плавления ( $2135\text{ }^\circ\text{C}$ ), высокая твердость (16 ГПа), относительно низкий удельный вес (при теоретической плотности  $3,58\text{ г/см}^3$ ), высокая механическая прочность (135–216 МПа при комнатной температуре, 120–205 МПа при  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ ), высокая стойкость к термическому и химическому воздействию, прозрачность в широком диапазоне длин волн (от ультрафиолетовой (УФ) до инфракрасной (ИК) области спектра) [1].

Перспективной технологией изготовления керамики на основе алюмомагниевои шпинели является электроимпульсного плазменного спекания (ЭИПС). Технология ЭИПС, благодаря высокой скорости нагрева, позволяет сократить время спекания и сохранить размеры зёрен консолидируемого материала на уровне исходных порошков [2–4].

Одна из проблем связанная с ЭИПС прозрачная керамики – это потемнение материала, которое может быть обусловлено как образованием кислородных вакансий, так и загрязнением консолидируемого материала графитом в процессе ЭИПС [5].

Решить указанную проблему можно несколькими способами [1], в том числе путем термической обработки (ТО) на воздухе.

В настоящей работе исследовано влияние температуры и продолжительности термической обработки на микротвердость и трещиностойкость керамики на основе алюмомагниевои шпинели.

Образцы изготавливали методом ЭИПС на установке SPS-515S (SPS SyntexInc., Япония) из коммерческого нанопорошка алюмомагниевои шпинели SC30R (Baikowski, Франция). Процесс проводили при температуре  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  под давлением 100 МПа. Продолжительность изотермической выдержки на заданной температуре спекания составляла 20 минут. В результате были получены образцы высотой 1,5 мм, диаметром 14 мм.

Термическую обработку на воздухе проводили в муфельной печи ЛНТ 02/18 (Nabertherm, Германия) в диапазоне температур от  $700\text{ }^\circ\text{C}$  до  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ . Продолжительность изотермической выдержки на заданной температуре отжига варьировалась от 1 до 30 часов. Режимы ТО представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры термической обработки керамических образцов

Серия	Температура, $^\circ\text{C}$	Время выдержки, час
1	700	1
	900	
	1100	
	1300	
2	900	1
		4
		10
		15
		20
		30

Микротвердость ( $H_V$ ) измеряли на универсальном твердомере DuraVision G5 20 (EMCO-TEST, Австрия) по методу Виккерса при нагрузке 4,9 Н в соответствии со стандартом ISO 6507-1:2005 «Измерение твердости по Виккерсу». Критический коэффициент интенсивности напряжений первого рода ( $K_{IC}$ ), характеризующий трещиностойкость материала, определяли по формуле Ниихары [6] на основе измерения длин поверхностных радиальных трещин, берущих начало от углов отпечатка.

На рисунке 1 представлены зависимости микротвердости и трещиностойкости от температуры ТО для образцов первой серии.

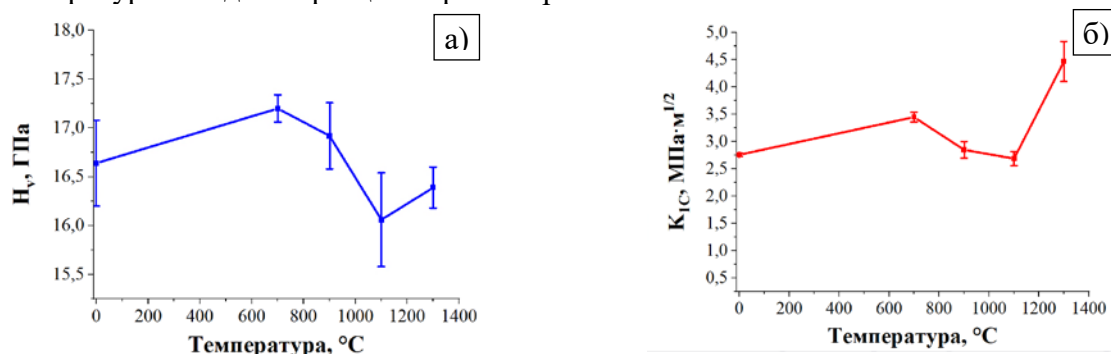


Рисунок 1 – Зависимость механических характеристик образцов серии 1 от температуры термической обработки: а) микротвердость; б) трещиностойкость

При увеличении температуры ТО от 0 до 700 °С наблюдается повышение микротвердости от 16,64 ГПа до 17,2 ГПа. При повышении температуры ТО от 700 до 1300 °С наблюдается понижение микротвердости от 17,2 до 16,06 ГПа. Результаты измерения микротвердости при температурах отжига 1100 °С и 1300 °С, сопоставимы и не выходящее за пределы доверительного интервала измерения этой величины. Наибольшее значение микротвердости (17,2 ГПа) демонстрирует образец, отожженный при 700 °С.

Трещиностойкость образцов, с увеличением температуры ТО, изменяется немонотонно. При увеличении температуры ТО от 0 до 700 °С наблюдается повышение трещиностойкости от ХХ до 3,45  $MPa \cdot m^{1/2}$ . При повышении температуры ТО от 700 до 1100 °С наблюдается понижение трещиностойкости от 3,45  $MPa \cdot m^{1/2}$  до 2,69  $MPa \cdot m^{1/2}$ . С увеличением температуры ТО до 1300 °С наблюдается повышение трещиностойкости до 4,47  $MPa \cdot m^{1/2}$ .

Наибольшее значение трещиностойкости (4,47  $MPa \cdot m^{1/2}$ ) демонстрирует образец, отожженный при 1300 °С.

На рисунке 2 представлены зависимости микротвердости и трещиностойкости от продолжительности изотермической выдержки для образцов второй серии.

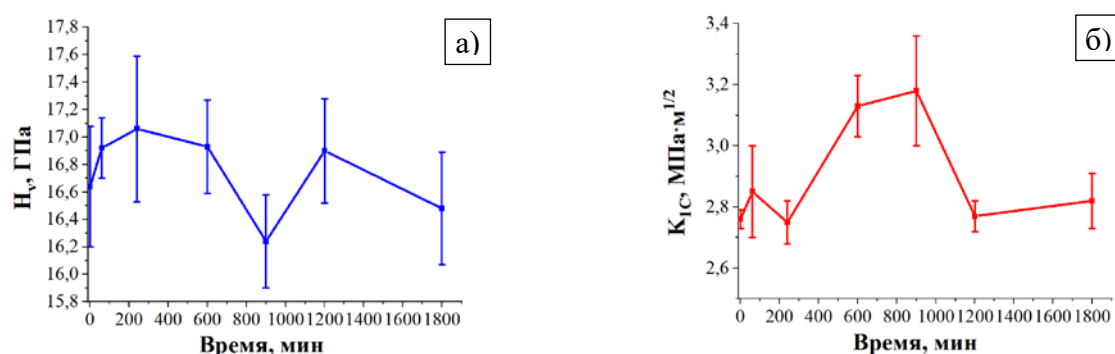


Рисунок 2 – Зависимость механических характеристик образцов серии 2 от времени изотермической выдержки: а) микротвердость; б) трещиностойкость

Изменения микротвердости и трещиностойкости образцов серии № 2 практически не выходят за пределы доверительного интервала измерения этой величины. Однако

наблюдается тенденция к понижению микротвердости и повышению трещиностойкости с увеличением продолжительности изотермической выдержки. Для образцов, время ТО которых составило 10 и 15 часов, наблюдаются максимальные значения трещиностойкости –  $3,13 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  и  $3,18 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , соответственно.

В результате работы проведена термическая обработка АМШ-керамики на воздухе. Изучено влияния параметров ТО на микротвердость и трещиностойкость. Сделаны следующие выводы:

1. Термическая обработка при температуре  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  и продолжительности изотермической выдержки 1 час обеспечивает повышение микротвердости на  $0,56 \text{ ГПа}$  и трещиностойкости на  $0,69 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ .

2. Для получения АМШ-керамики с наибольшей трещиностойкостью ТО целесообразно проводить при температуре  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  и выдержки 10 часов.

Таким образом, на основе полученных результаты можно рекомендовать режим термической обработки (температура -  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , продолжительность изотермической выдержки - 10 часов), позволяющий получить прозрачную сочетающую в себе относительно высокие значения твердости и трещиностойкости.

*Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-73-01241 на оборудование ЦКП НОИЦ НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России № 075-15-2021-710.*

#### Список литературы

1. Ganesh I. A review on magnesium aluminate ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) spinel: synthesis, processing and applications // International Materials Reviews. – 2013. – V. 115, № 16. – P. 63–112.
2. Мелехин Н.В., Болдин М.С., Попов А.А. и др. Исследование влияния внутренних напряжений на баллистическую стойкость мелкозернистого оксида алюминия, полученного методом электроимпульсного плазменного спекания // Проблемы прочности и пластичности. – 2022. – Т. 84, № 2. – С. 272–281.
3. Нищев К.Н., Панов А.А., Заикин А.И. Синтез, структура и спектрально-люминесцентные свойства магний-алюмосиликатной стеклокерамики, активированной ионами никеля // Физико-математические науки. Физика. – 2014. – Т. 29, № 1. – С. 97–112.
4. Гольева Е.В., Толстикова Д.В., Михайлов М.Д., и др. Оптические свойства прозрачной керамики  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  // Сборник трудов конференции «Прикладная оптика - 2014». – 2014. Т. 3. – С. 14–17.
5. Комоликов Ю. И., Пудов В.И. Получение композитной  $\text{ZrO}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$  металлокерамики в условиях механоактивационного и термического воздействий // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 3. – С. 1058 – 1061.
6. Хасанов О.Л. Методы измерения твердости и трещиностойкости наноструктурных керамик. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 101 с.