

## ТЕРМОУДАРНЫЕ НАГРУЖЕНИЯ КЕРАМИКИ MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

*Ю.Л. Кретов<sup>1,3</sup>, Е.А. Деркач<sup>1,2</sup>, С.П. Буякова<sup>1,2,3</sup>, С.Н. Кульков<sup>1,2,3</sup>*

Научный руководитель: профессор, д. т. н. С.П. Буякова

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: kretov2005@yandex.ru

Керамики и керамические композиты в последнее время все чаще рассматриваются с позиций термостойкости в качестве материалов для изготовления тепловой защиты промышленных термических установок, энергетических систем авиационной и ракетно-космической техники. По сравнению с металлами они имеют более высокую температуру плавления и существенно меньшую теплопроводность. Большинство исследований термостойкости керамических материалов выполняется в режиме стационарного теплового потока. Однако при эксплуатации термонагруженных конструкций довольно часто в результате быстрого нагрева или быстрого охлаждения реализуется термоудар. Устойчивость к термическому удару не является фундаментальной характеристикой материалов и в значительной мере зависит от их структуры и фазового состава [1–3].

Целью данной работы явилось изучение влияния состава керамики MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на устойчивость к термоудару. Отсутствие легкоплавких эвтектик в системе MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обуславливает её исключительное положение с позиций термической стойкости. В ходе эксперимента и анализа результатов исследований определен состав керамики, наиболее устойчивой к циклическим термоударным воздействиям.

Исследования проводились на образцах цилиндрической формы h=20 мм, d=12 мм. Образцы получены спеканием порошковых смесей при температуре 1600 °С с изотермической выдержкой в течение часа. Содержание компонентов MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в керамике варьировалось от 0 до 100%. Термоударные нагрузки проводились охлаждением образцов керамики в воду от температуры 200–1000 °С. Анализ структуры керамики до и после термонагрузений осуществлялся на полированной поверхности образцов. Фазовый состав исследовался по рентгеновским дифрактограммам в интервале углов дифракции 10–90°, полученным при фильтрованном CuKα излучении.

В системе MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> существует ряд твердых растворов и только одно стехиометрическое соединение – алюмомагниева шпинель MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> [4]. Идентификация рентгенограмм показала, что по мере увеличения объемной доли оксида магния в керамике MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> возрастала объемная доля алюмомагниева шпинели. На рентгенограммах образцов керамики с содержанием MgO 50 и 70% присутствовали только рефлексы MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. При меньшем содержании оксида магния хорошо различимы рентгеновские рефлексы твердых растворов на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> алюминия, при большом его содержании рефлексы твердых растворов на основе MgO. Установлено, что с увеличением MgO в системе происходило увеличение областей когерентного рассеяния для всех фаз. На основе полученных рентгенограмм исследуемой системы в исходном состоянии и после термоударных нагрузений, определили, что последнее не приводит к изменению фазового состава керамики MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В ходе исследований на термостойкость обнаружено изменение структуры поверхностного слоя образцов керамики, так при термонагрузениях от 600–800 °С, на образцах керамики с малым содержанием MgO до 10% появились трещины вследствие термических напряжений внутри образца, полное их разрушение зафиксировано после двукратного термического нагружения от 1000 °С. Образцы с 20–30% MgO – обладали большей термостойкостью, первые трещины на поверхности образцов обнаружены после термонагружения от 900 °С, полное разрушение после 6 циклов термоударных нагружений от 1000 °С. При 90–100% MgO, первые трещины на поверхности образцов зафиксированы при термонагружении от 1000 °С, полное их разрушение – после пятикратного термонагружения от 1000 °С. На образцах с 70% MgO появление первых трещин обнаружено после двукратного термонагружения от 1000 °С, но разрушение так и не произошло после 75 циклов. При 50% MgO в системе MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ни появления трещин ни разрушения так и не обнаружено после 75 термоударных нагружений (рис. 1). Состав керамики MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с 50% MgO показал наилучшую стойкость к циклическим термоударным воздействиям. Устойчивость данного состава керамики к термоударным нагрузениям объясняется тем, что он имеет определенный объем порового пространства (30%) и характерную геометрию пор, в результате чего происходит диссипация напряжений, образовавшихся во время агрессивного термического удара.

При испытании на термостойкость образцов, синтезированных из порошка алюмо-магниева шпинели методом горячего прессования (пористость 1%), установлено, что керамика разрушается после 3 циклов термоударных нагружений от 1000 °С. При испытании на термостойкость образцов системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, полученных методом горячего прессования (пористость 3–5%), разрушение наблюдалось после 2 циклов термонагружений от 1000 °С. Можно сделать вывод о том, что пористость в данном случае является одним из основополагающих факторов термостойкости данного материала. При увеличении пористости системы MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 50%, улучшения термостойкости обнаружено не было.

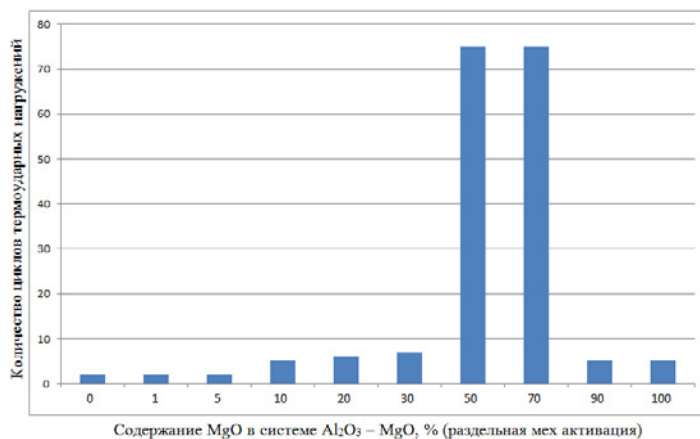


Рис. 1. Количество циклов термоударных нагружений до разрушения системы, в зависимости от содержания MgO

В ходе проведенных исследований определили, что в исходном состоянии керамика MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет три фазы: оксид алюминия, оксид магния и алюмо-магниевою шпинель (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>). Циклические термоударные нагружения не приводят к изменению фазового состава MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Керамика, с содержанием 50 и 70% MgO является наиболее устойчивой к циклическим термоударным воздействиям.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № RFMEFI60714X0069).*

#### Список литературы

1. Buyakova S.P., Promakhov V.V., Kulkov S.N. Thermal tests and their effect on micro- and macrostructure of nanocrystalline ZrO<sub>2</sub> // Powder Metall. Met. Ceram., – 2012. – Vol. 51, No. 5–6. – P. 267–272.
2. Buyakova S.P., Kalatur E.S., Buyakov A.S. et al. Structure and properties of ZrO<sub>2</sub>-MgO powders // Journal of Silicate Based and Composite Materials. – 2014. – Vol. – P. 8–12.
3. Myhre B., Sandberg B., Hundere A. Castables with MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as bond phase / Presented at the XXVI ALAFAR. Congress, San Juan, Puerto Rico, Oct. 30-Nov.1, 1997.
4. Черепанов А.М., Тресвятский С.Г. Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. – М. : Металлургия. 1967. – 215 с.