

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НА СТРУКТУРУ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РАЗРУШЕНИЕ СПЕЧЕННОЙ КЕРАМИКИ $ZrO_2(Me_xO_y)$

Степанюк А.В.¹, Фадеев В.В.², Калатур Е. С.³

Научные руководители: Буякова С.П.^{1,2,3}, Кульков С.Н.^{1,2,3}

¹Томский политехнический университет, 634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30

²Томский государственный университет, 634050, Россия, г.Томск, пр. Ленина, 36

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, Россия, г.Томск, пр.Академический, 2/4

E-mail: carity6@gmail.com

Деформационное поведение компактных хрупких материалов, к которым относятся керамические материалы, под действием внешней нагрузки вплоть до разрушения можно охарактеризовать как линейно-упругое. Однако наличие в них пористости приводит, как правило, к изменению характера деформационного поведения. Для таких материалов свойственны нелинейные законы связи между напряжением и деформацией.

Проведенный анализ публикаций, посвященных исследованию особенностей деформационного поведения пористых керамик, показал, что исследования в этой области начаты давно [1-3]. Несмотря на несомненную ценность подобных исследований, вопрос о взаимосвязи между формирующейся в процессе получения пористых керамик структурой, характером пористости и их деформационным поведением остается *актуальным*.

В связи с вышесказанным *цель работы* – изучить влияние пористости на структуру, деформацию и разрушение пористой керамики $ZrO_2(Me_xO_y)$.

В качестве материалов для исследований использовались образцы пористых керамик, полученные из порошков, синтезированных методами плазмохимии $ZrO_2(Y_2O_3)$, $ZrO_2(MgO)$ и химического осаждения $ZrO_2(Y_2O_3)$. Получение образцов керамик заключалось в прессовании порошка и последующем спекании прессовок. Необходимый объем и конфигурация пор обеспечивались варьированием температуры спекания в интервале гомологических температур от 0.56 до 0.63 и продолжительности изотермической выдержки от 1 до 5 часов.

Исходные порошки $ZrO_2(Y_2O_3)$, $ZrO_2(MgO)$, синтезированные методом плазмохимии, практически не отличались по морфологическому составу. Порошки состояли из пустотелых частиц сферической формы и большого числа агрегатов, не имеющих регулярной формы. Исследования показали, что порошок $ZrO_2(Y_2O_3)$, синтезированный методом химического осаждения, состоял из крупных поликристаллических частиц осколочной формы и более мелких частиц. В распределении частиц по размерам присутствовал один максимум, при этом большее количество частиц имело размер менее 12 мкм, но присутствовали и более крупные частицы, размер которых достигал 80 мкм.

Исследования показали, что структура кера-

мик, полученных из порошков, синтезированных методом плазмохимии, представляла собой ячеистый каркас, сформированный укладкой полых частиц порошка. Ячейки имели форму близкую к сферической. Размер ячеек многократно превышал толщину их стенок, которая представляла собой однослойную укладку зерен ZrO_2 .

Пористость в этих керамиках представлена двумя видами пор, то есть распределение пор по размерам являлось бимодальным. Первый максимум сформирован эквипастичными порами – пустотами, не заполненными частицами порошка в процессе прессования, а второй – крупными ячеистыми пустотами. В случае керамики, полученной из порошка $ZrO_2(Y_2O_3)$, синтезированного методом химического осаждения, структура представляла собой хорошо различимую зеренную структуру. Распределение пор по размерам было унимодальным. Увеличение доли пор в материале привело к увеличению среднего размера эквипастичных пор до 2 мкм.

Деформационные диаграммы пористых керамик $ZrO_2(Me_xO_y)$ начинались с участка нелинейной связи между напряжением и деформацией. Нагружение образцов керамик с бимодальным распределением пор по размерам, в режиме «нагрузка-разгрузка» до величины деформации, соответствующих окончанию нелинейного участка, не выявило остаточной деформации, что является свидетельством нелинейно-упругого поведения пористых керамик с ячеистой структурой.

В случае керамик с унимодальным распределением пор « σ - ϵ » диаграммы также характеризовались наличием нелинейного участка связи между напряжением и деформацией, при этом нагружение в режиме «нагрузка-разгрузка» на данном участке « σ - ϵ » диаграмм выявило наличие остаточной деформации. Данный факт является следствием компактирования и перемещения локальных объемов материала в поровое пространство.

Обнаруженная особенность « σ - ϵ » диаграмм пористых керамик, заключающаяся в наличии участка нелинейной связи между напряжением и деформацией, связана с ячеистой структурой материала. Данное предположение основано на имеющихся в литературе данных о деформационном поведении и механических свойствах материалов, имеющих ячеистую или стержневую структуру, « σ - ϵ » диаграммы которых также начинались с участка нелинейной связи между напряжением и деформацией. Авторы работы [4] рассчитали ве-

личину предела прочности и предельной деформации высокопористого ячеистого пенопласта на основе модели пористого материала, как состоящего из хаотически ориентированных ячеек, с целью прогнозирования их механических свойств и деформационного поведения. В каждой ячейке выделялся структурный элемент из шести стержней, составляющих ячейку.

Используя описанный выше подход к определению механических характеристик, в работе были рассчитаны предел прочности при сжатии и предельная деформация пористой керамики с ячеистой структурой. На РЭМ-изображениях поверхностей разрушения керамик выбирались ячеистые элементы близкие к сферической форме. В каждой ячейке выделялся структурный элемент из шести стержней, состоящих из зерен ZrO_2 , рис.1.

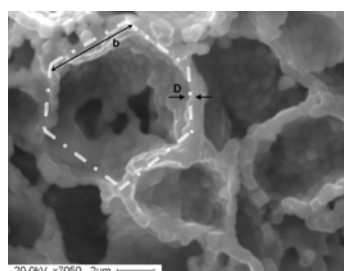


Рис.1. Структура керамики $ZrO_2(Me_xO_y)$.

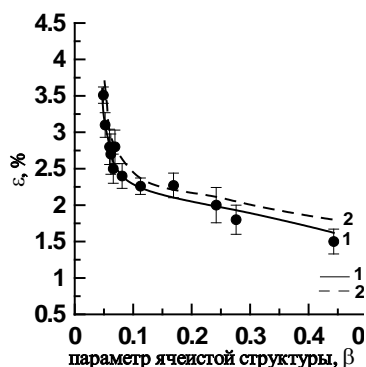


Рис.2. Зависимость относительной деформации от параметра ячеистой структуры керамики $ZrO_2(Y_2O_3)$.

Количественная оценка изменения величины предела прочности и предельной деформации в зависимости от изменения параметра ячеистой структуры показала довольно близкое соответствие результатов, полученных экспериментальным и расчетным путем, рис.2. Отличие в результатах, вероятно, обусловлено влиянием на экспериментальные данные наличия в керамиках дефектов, таких как поры, микротрещины. В результате проведенных исследований обнаружено подобие в механическом поведении высокопористых ячеистых пенопластов и пористых керамик с ячеистой структурой на основе диоксида циркония, что свидетельствует о том, что наблюдаемая на деформационных диаграммах нелинейная упругость при малых деформациях обусловлена механической неустойчивостью ячеистых элементов,

составляющих керамический каркас.

Выводы:

1. Показано, что порошки $ZrO_2(Y_2O_3)$ и $ZrO_2(MgO)$, полученные методом плазмохимии, состояли в основном из полых сферических частиц, в порошке $ZrO_2(Y_2O_3)$, полученном методом химического осаждения, частицы не имели регулярной формы. Порошки $ZrO_2(Y_2O_3)$, полученные этими методами, значительно отличались средним размером частиц, но имели одинаковый средний размер кристаллитов $\langle D \rangle = 20$ нм тетрагональной модификации диоксида циркония и не отличались площадью удельной поверхности $7 \text{ м}^2/\text{г}$.

2. Показано, что независимо от морфологического строения частиц порошков $ZrO_2(Me_xO_y)$ увеличение объема порового пространства сопровождалось увеличением среднего размера пор в полученных из них керамиках.

3. Показано, что структура керамик из порошков $ZrO_2(Y_2O_3)$ и $ZrO_2(MgO)$, полученных методом плазмохимии, представляла собой ячеистый каркас с бимодальным распределением пор по размерам, состоящий из крупных ячеистых пустот, сформированных полыми сферическими частицами порошка, и эквивалентных пор. В керамике из порошка, полученного методом химического осаждения, пористость представлена только эквивалентными порами.

4. Установлено, что керамики $ZrO_2(Me_xO_y)$ при пористости более 30 % с бимодальным распределением пор по размерам при нагружении сжатием проявляют микромеханическую неустойчивость, обусловленную обратимой деформацией ячеистых элементов. Для такой керамики увеличение объема порового пространства сопровождается увеличением деформации в упругой области.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Соглашение № 14-08-31087\14), Гранта Президента № МК-5681.2014.8.

Список литературы:

- Кульков С.Н. Негуковское поведение пористого диоксида циркония при активной деформации сжатием / С.Н. Кульков, В.И. Масловский, С.П. Буякова // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72. – Вып.3. – С. 38-42.
- Барбашов В.И. Анизотропия механических свойств керамики из диоксида циркония при изгибных испытаниях / В.И. Барбашов, Ю.Б. Ткаченко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – № 10. – С. 2-5.
- Гогоци Г.А. Механическое поведение керамики и кристаллов на основе диоксида циркония. Сообщение 1. Испытания при изгибе / Г.А. Гогоци, Д.Ю. Островой // Проблемы прочности. – 1995. – № 7. – С. 41-47.
- Дементьев А.Г. Влияние ячеистой структуры пены на механические свойства пенопластов / А.Г. Дементьев, О.Г. Тараканов // Механика полимеров. – 1970. – Т.4. – С. 594-602.