

05.1

## Механическая неустойчивость пористого материала

© С.П. Буюкова, В.И. Масловский, Д.С. Никитин, С.Н. Кульков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
Томский государственный университет

Поступило в Редакцию 1 июня 2001 г.

Исследованы особенности деформационного поведения керамики на основе частично стабилизированного диоксида циркония  $ZrO_2(Y_2O_3)$ , обусловленные наличием пористости разной морфологии. Обнаружен эффект механической неустойчивости сформированных в процессе синтеза керамики стержневых и пластинчатых структур.

Синтез пористых материалов с необходимым комплексом свойств требует детального исследования закономерностей формирования физико-механических характеристик в зависимости от особенностей структуры. В большей степени это касается керамических материалов, поскольку наличие пористости приводит, как правило, к катастрофическому снижению механической прочности вследствие ограниченной возможности релаксации концентраторов напряжений при их нагружении, так как в керамиках практически отсутствует возможность для движения дислокаций.

В работе [1] изучено деформационное поведение керамики на основе частично стабилизированного диоксида циркония  $ZrO_2(Y_2O_3)$  в интервале пористости от 10 до 65% со средним размером пор, соизмеримым со средним размером зерна. Показано, что в пористом керамическом материале кроме упругой макродеформации и накопления микрповреждений в виде микрорастрескивания возможно перемещение локальных

объемов материала в поровое пространство. Однако проведенный анализ деформационных диаграмм не позволил в полной мере выявить все особенности в деформационном поведении пористой керамики и, кроме того, остался не решенным вопрос о связи механического поведения керамики с геометрией порового пространства.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния пористости различной морфологии на механическое поведение керамики на основе частично стабилизированного диоксида циркония при активной деформации сжатием.

В качестве объекта исследований использовались образцы керамики с пористостью от 10 до 60% на основе  $ZrO_2$ , частично стабилизированного 3% mol.  $Y_2O_3$  со средним размером пор, соизмеримым с размером зерна и со средним размером пор, значительно (на несколько порядков) превышающим размер зерна. Образцы изготавливались методом порошковой металлургии путем прессования и последующего спекания ультрадисперсного порошка керамики в интервале температур 1200–1600°C, чем обеспечивалась различная конечная пористость образцов со средним размером пор, соизмеримым со средним размером зерна. Для получения более крупных пор в порошок добавлялись легко выгорающие частицы порообразователя (канифоли, парафина).

Испытания образцов на сжатие осуществлялись на испытательной машине "INSTRON-1185" с постоянной скоростью нагружения  $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . При этом фиксировались кривые нагружения, по которым определяли предел прочности и относительную деформацию материала.

Независимо от соотношения среднего размера пор и среднего размера зерна в изучаемой керамике увеличение объема порового пространства в структуре материала приводит к появлению множественных микроповреждений в процессе деформирования, причем тем большим, чем больше величина пористости. Этот процесс проявляется на диаграммах нагружения в виде резких падений напряжения вследствие микрорастрескивания, при этом микротрещины останавливаются на порах, и материал восстанавливает способность к упругому деформированию. С увеличением пористости область появления микрорастрескивания смещается в область больших деформаций и становится более протяженной. Диаграммы деформирования керамики с пористостью более 20% имеют прогиб вниз, что совершенно не характерно для кривых нагружения спеченных материалов и может свидетельствовать,

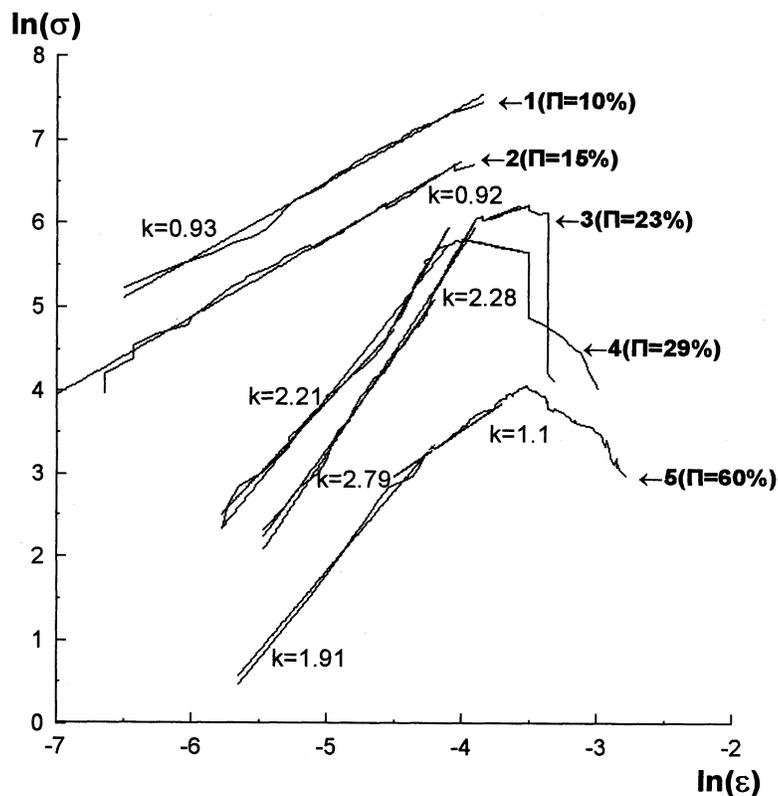
как и в [1], о перемещении локальных объемов материала в процессе нагружения.

Традиционно для описания деформационных диаграмм используют степенную зависимость вида  $Y = bX^k$ . Величина показателя степени  $k$  определяется тем, какой из процессов — прессование или пластическое формоизменение является определяющим в данном материале. Для чисто упругого деформирования  $k = 1$ , для пластической деформации  $k < 1$ , а для процесса прессования  $k > 1$ . Для определения показателя степени уравнения деформирования необходимо перестроить экспериментальные данные в логарифмических координатах  $\ln \sigma - \ln \varepsilon$ , а  $k$  равен наклону прямой.

Из рис. 1 видно, что диаграммы керамики с пористостью более  $\sim 20\%$  при логарифмировании преобразуются в несколько прямолинейных отрезков с разным наклоном и соответственно имеют несколько величин  $k$ , причем чем больше пористость, тем больше число линейных участков может быть выделено.

На рис. 2, *a* приведены измеренные по наклонам прямолинейных участков все показатели степени  $k$  уравнения деформирования при сжатии керамики со средним размером пор, соизмеримым со средним размером зерна от величины пористости  $\eta$ . Видно, что экспериментальные значения  $k$  хорошо ложатся на три прямые, при этом существует критическое значение пористости, при котором характер деформирования пористого тела принципиально изменяется, появляется второй показатель степенной функции со значением, существенно большим, чем в исходном состоянии. Скорее всего, это связано с изменением характера распределения пор — от изолированных пор к непрерывной поровой структуре. При этом материал фактически разделяется на две подсистемы, по-разному деформирующиеся под действием внешнего нагружения.

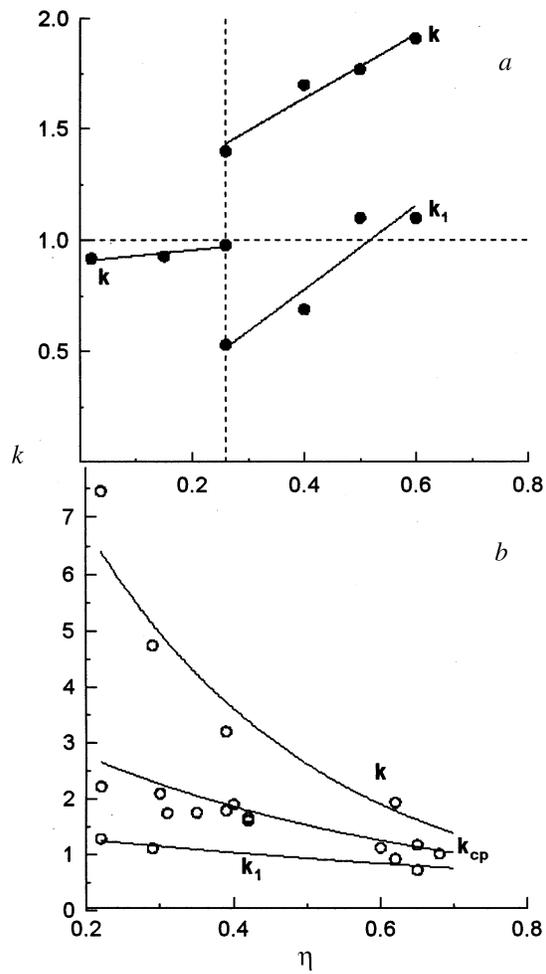
Для материалов с крупной пористостью характерен иной вид зависимости  $k$  от пористости: чем меньше ее величина, тем в среднем больше показатель степенной функции, экспоненциально уменьшающийся с ростом пористости (рис. 2, *b*). На рисунке верхняя зависимость получена при аппроксимации значений показателя степени для начальных отрезков деформационных диаграмм керамики с разной пористостью, нижняя зависимость получена при аппроксимации значений показателей степени для всех последующих отрезков, а средняя зависимость получена при аппроксимации усредненных значений показателей степени для



**Рис. 1.** Диаграммы деформирования в логарифмических координатах (в скобках указана пористость). Числа — показатели степени в уравнении деформирования.

каждой диаграммы деформирования. При этом, хотя и из-за случайности процесса микроразрушения подобных материалов, измеренные значения  $k$  распределены довольно хаотично в координатах "k-пористость", в целом они не выходят за аппроксимирующие экспоненциальные кривые.

Металлографические исследования поверхностей деформированных образцов после снятия нагрузки до начала накопления микрповреждений показали, что на поверхности образцов нет никаких следов перемещения локальных объемов материала, связанного с процессом прессования. Более того, на этой стадии кривые деформирования явля-



**Рис. 2.** Зависимость показателя степени уравнения деформирования от объема порового пространства:  $a - d_1 \cong d_2$ ,  $b - d_1 \ll d_2$  ( $d_1$  — размер зерна,  $d_2$  — размер пор).

ются обратимыми по деформации, т.е. процесс деформирования чисто упругий. При наложении фотографических изображений структуры керамики, полученных до нагружения сжатием и после снятия нагрузки при достижении относительной деформации 1.5%, что соответствует области прогиба на диаграммах деформирования, наблюдается полное совмещение изображений.

Таким образом, поскольку экспериментально перемещения объемов материала в поровое пространство обнаружено не было, то следует считать, что процесс прессования отсутствует и имеет место только упругая деформация — упругое взаимодействие элементарных объемов в пористой структуре. Однако наличие столь высоких значений  $k$  до 8 при деформировании без следов остаточной деформации является совершенно неожиданным.

Приведенные выше результаты характеризуют отклик образца, представляющего собой деформируемую систему, образованную в результате технологического процесса "прессование–спекание", состоящую из большого числа частиц случайной формы в той или иной степени, связанных с соседями, на одноосное нагружение. Наличие конструктивных особенностей в этой системе порождает и характер зависимости  $\sigma(\varepsilon)$ , фиксируемой в процессе эксперимента и существенно отличающейся от соответствующих изотропному упругому материалу. Эти особенности предполагают для исследования поведения образца анализ возможных механизмов деформации элементов конструкции, образующих испытываемый керамический образец. К ним, в частности, можно отнести механизм, опирающийся на известное решение задачи Герца о контакте двух однородных тел [2,3]. Распространяя решение задачи [2] на случай соприкосновения тел произвольной формы, будем иметь, переходя к условным напряжениям,

$$\sigma \approx AE\varepsilon^{3/2}, \quad (1)$$

где  $A$  — константа, зависящая от плотности упаковки контактирующих зерен и соотношения их размеров.

Для систем зерен, имеющих линейную или пластинчатую структуру или ослабленные связи с соседями вдоль линий и плоскостей, возможен бифуркационный переход в смежное состояние равновесия, сопровождающееся обратимым изгибом, исчезающим при устранении причин, его вызвавших. Такие структуры, допускающие модельное представление в виде стержня, возможны в высокопористых керамиках с ограниченной поверхностью контакта зерен. В силу малых размеров самих зерен и

незначительных размеров площади контакта, образовавшихся при спекании, возникающие после потери устойчивости изгибные напряжения не превосходят предела прочности материала керамики (практически бездефектного в пределах зерна диоксида циркония).

Для оценки деформационного отклика таких структур после потери устойчивости рассмотрим известную задачу об эластике Эйлера [4]. Не повторяя исходных положений указанной работы, отметим, что угол поворота, искривляемого при потере устойчивости шарнирно опертого стержня, определяется из соотношения

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - m^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{kl}{2}; \quad \left( \begin{array}{l} \sin \frac{\Theta_0}{2} = m \\ k = \sqrt{\frac{P}{EJ}} \end{array} \right), \quad (2)$$

где  $P$  — величина действующей на стержень силы;  $E$  — модуль сдвига материала;  $J$  — момент инерции поперечного сечения длиной  $l$ .

Рассматривая случай малых  $m$  (т.е. незначительных превышений силой критического значения), разлагая подынтегральную функцию в ряд и учитывая, что перемещение подвижного торца стержня [4] в два раза больше перемещения его середины, получим для относительной деформации стержня в закритической области:

$$\Delta\varepsilon = 1 - \frac{2}{kl} (2\varepsilon - \Phi), \quad \text{где} \quad \varepsilon = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - m^2} \sin \varphi d\varphi. \quad (3)$$

Проводя необходимые преобразования, получим:

$$\frac{\Delta\bar{P}}{P_c} = \frac{\Delta\varepsilon}{2}, \quad \text{где} \quad \Delta P = P - P_c, \quad P_c = \frac{\pi^2 EJ}{l^2} \quad (4)$$

или

$$\frac{\Delta P}{S} = \Delta\sigma = \frac{P_c}{2S} \Delta\varepsilon = \frac{\sigma_c}{2} \Delta\varepsilon, \quad (5)$$

где под  $\Delta\varepsilon$  понимается дополнительная деформация, обусловленная закритическим изгибом, а  $S$  — площадь сечения стержня. Если (5) записать в виде

$$\Delta\sigma = E \frac{\varepsilon_c}{2} \Delta\varepsilon, \quad (6)$$

то видно, что при потере устойчивости деформации, обусловленные превышением нагрузки над критической, линейно зависят от прираще-

ния напряжений, но будут иметь порядок в  $(2/\varepsilon_c)$  раз больший, чем деформация в соответствии с законом Гука.

Таким образом, в соответствии с этими оценками даже при потере устойчивости малозвенных стержневых структур, сформированных при спекании пористого тела, возможна их значительная макродеформация как структурных элементов, осуществляемая в упругой области, что и наблюдается экспериментально.

## Список литературы

- [1] Буюкова С.П., Хан Вей, Мельников А.Г., Кульков С.Н. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 17. С. 44–48.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 247 с.
- [3] Амен-Заде Ю.А. Теория упругости. М.: Высш. школа, 1971. 288 с.
- [4] Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.