

Влияние формы и расположения пор на эффективные характеристики пористой керамики

А.М. Утукина^{а,*}, И.Ю. Смолин^{а,б}, В.А. Зимина^б

^а Томский государственный университет, 634050, пр. Ленина, 36, г. Томск, Российская Федерация

^б Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, пр. Академический, 2/4, г. Томск, Российская Федерация
anastasiya_utukina@vk.com

Введение

В последнее время значение пористых керамик в промышленности возросло благодаря их уникальному сочетанию свойств. Их характеристики, такие как низкая плотность, большая удельная поверхность, высокая ударная вязкость, высокая стойкость к тепловому удару, хорошая теплоизоляционная способность и низкая диэлектрическая проницаемость открывают новые возможности для широкого спектра применений – от многочисленных промышленных процессов до бытовых изделий. Известно, что форма пор и распределение их в пространстве влияют на эффективные свойства пористого материала. Целью данной работы является проведение численного исследования механического поведения пористых керамик при одноосном растяжении методом конечных разностей.

Постановка задачи

Объектом исследования являлись модельные структуры пористой керамики с разной формой и расположением пор: структура 1 – эллипсоидные поры с хаотичным расположением; структура 2 – эллипсоидные поры с регулярным расположением; структура 3 – круговые поры с хаотичным расположением; структура 4 – круговые поры с регулярным расположением (рис. 1). При этом объемная доля пор во всех структурах была одинаковой и составляла 16,5 %. Каркас исследуемых структур соответствовал оксиду алюминия, поры учитывались явно.

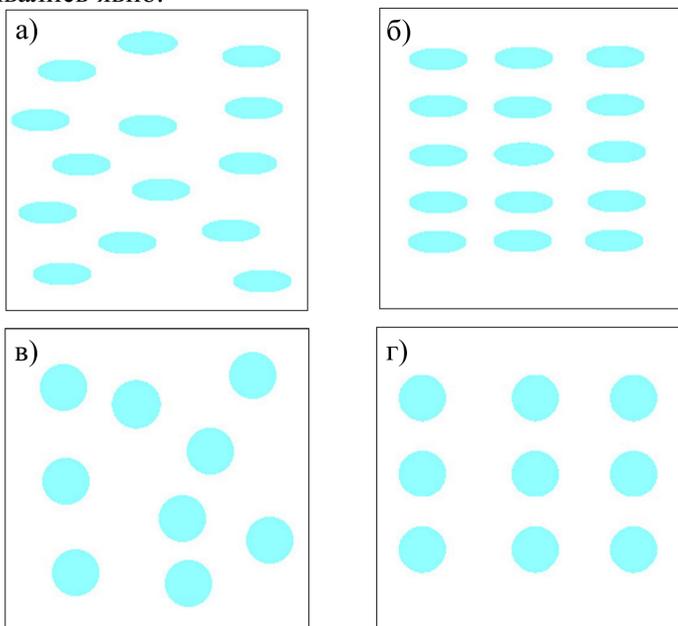


Рисунок 1. Модельные структуры пористой керамики

Моделирование механического поведения проводилось в двумерной постановке в условиях плоской деформации. Для компьютерного исследования процессов деформирования и развития разрушения в исследуемых образцах был использован конечно-разностный метод численного решения дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела в рамках лагранжевого описания сплошной среды.

Математическая постановка задачи:

Основные законы сохранения:

$$\rho_0 V_0 = \rho V; \quad \rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x^j}; \quad \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt};$$

Геометрические соотношения:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} + \frac{\partial v_j}{\partial x^i} \right); \quad \dot{\omega}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x^j} - \frac{\partial v_j}{\partial x^i} \right);$$

Определяющие соотношения:

$$\dot{P} = -K\dot{\theta}, \quad \dot{s}_{ij} = 2G \left[\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{\theta} \delta_{ij} \right] - s_{ik} \dot{\omega}_{kj} + s_{kj} \dot{\omega}_{ik},$$

$$\sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + s_{ij};$$

Модель упруго-хрупкой повреждаемой среды:

$$D(t) = \int_{t_0}^t \frac{[H(\mu_\sigma)(\sigma - \sigma_0^c)^2 + (1 - H(\mu_\sigma))(\sigma - \sigma_0^t)^2] dt}{\sigma_*^2 [H(\mu_\sigma)t^c + (1 - H(\mu_\sigma))t^t]};$$

Результаты моделирования

В результате проведенного численного исследования были построены макроскопические диаграммы деформирования и

картины разрушения рассматриваемых структур пористой керамики. Анализ усредненных диаграмм деформирования (рис. 2) позволил определить предельные значения эффективных напряжений, а также эффективные упругие модули (табл. 1). Показано, что для структур с эллипсоидной формой пор оказались выше как предельные значения напряжений, так и эффективные упругие модули.

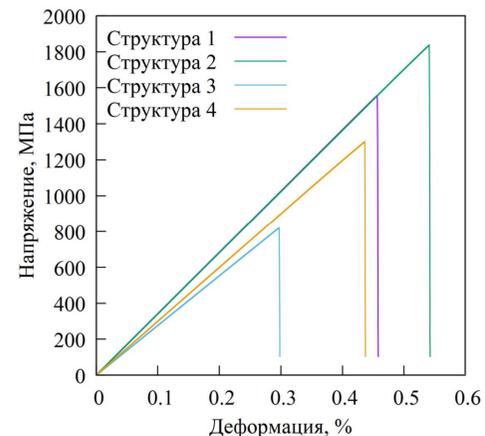


Рисунок 2. Диаграммы деформирования пористых керамик при одноосном растяжении

Таблица 1. Эффективные физико-механические характеристики пористых керамик

Модельные структуры	Модуль Юнга E, ГПа	Модуль объемной упругости K, ГПа	Модуль сдвига G, ГПа	Коэффициент Пуассона ν	Предел прочности при растяжении, МПа
Структура 1	309	267	117,5	0,312	1558
Структура 2	317	228	124	0,264	1837
Структура 3	257	187	102	0,268	821
Структура 4	282	190	112	0,246	1300

Также было проанализировано влияние неоднородностей структуры пористой керамики на локальное разрушение материала (рис. 3). Показано, что место зарождения трещин определяет наличие концентраторов напряжений в структуре материала и влияет на их распространение. Трещины зарождаются вблизи пор и распространяются перпендикулярно оси нагружения, а также под углом 45°, что характерно для разрушения хрупких материалов.

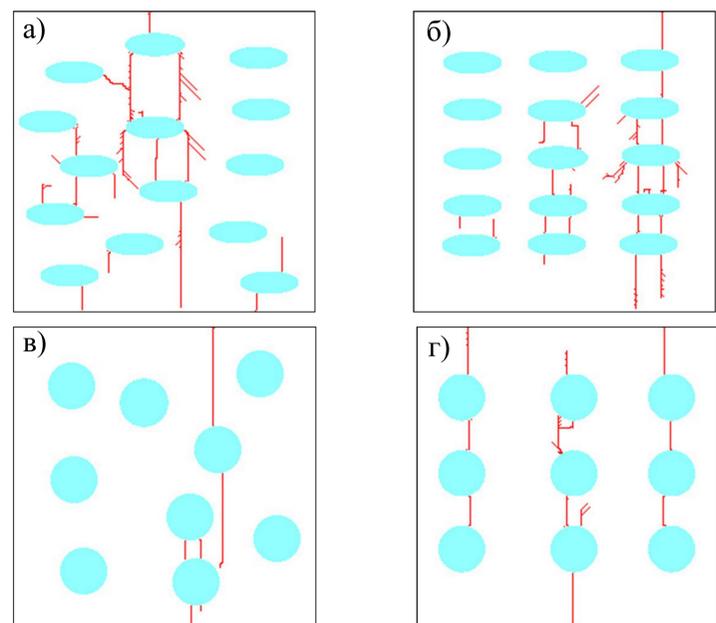


Рисунок 3. Картины разрушения модельных структур пористых керамик

Заключение

В результате моделирования деформации и разрушения на мезоуровне было выявлено влияние неоднородной структуры пористой керамики на ее эффективные механические характеристики: упругие модули сдвига и объемного сжатия, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и предел прочности при растяжении. Показано, что для пористых структур с эллипсоидными порами эффективные упругие модули и прочность оказались выше, чем у структур с круговыми порами на 10-20 %.