

05

Конечно-элементное моделирование деформационного поведения пористой керамики

© О.В. Килина, П.С. Килин, С.Н. Кульков

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: kulkov@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 22 января 2002 г.

На основе результатов конечно-элементного моделирования проанализировано деформационное поведение пористой керамики. Показано, что в результате нагружения структурно-неоднородных материалов в них формируются области локализации, расположенные под углом 45° к оси нагружения, разбивающие материал на фрагменты, средний размер которых равен среднему расстоянию между порами. В процессе нагружения таких материалов выделяются три стадии, на которых материал, находящийся под нагрузкой, не испытывает локального разрушения, стадия нелинейного накопления объема разрушенного материала и стадия полного разрушения.

Прочностные свойства материалов определяются различными механизмами деформации. Одной из интересных особенностей деформационного поведения является формирование областей локализованной пластической деформации. При этом в материалах с неоднородной структурой, как правило, рассматриваются случаи больших степеней деформации [1]. К структурным неоднородностям относятся поры, наличие которых качественным образом отражается на механизмах деформирования. Однако экспериментальные исследования этих вопросов связаны с определенными сложностями. Поэтому моделирование деформационного поведения пористого керамического материала с целью выявления областей локализации деформации, концентраторов напряжений, стадий деформации в процессе нагружения является актуальным.

Численное исследование проведено в рамках программного комплекса „COSMOS“ [2] на реальной структуре, полученной в результате эксперимента [3] и взятой за основу для решения плоской

упругой задачи. Размеры расчетной области составляют $80 \times 80 \mu\text{m}$, пористость равна 10%. Экспериментально измеренное распределение пор по размерам имеет унимодальный характер, при этом средний размер пор составляет $1.9 \mu\text{m}$, а дисперсия по размерам $\sigma_d = 1.3 \mu\text{m}$.

Дискретизация области решения выполнена треугольными конечными элементами. Для моделирования сжатия образца задано перемещение верхней границы модели по направлению к нижней границе, величина которого выбрана таким образом, чтобы в модели возникали напряжения, превышающие предел прочности материала. Нижняя граница модели жестко закреплена, т.е. наложены ограничения на перемещения и повороты во всех направлениях. Нагрузка изменялась во времени по линейному закону. В качестве исходных расчетных параметров — модуль Юнга и коэффициент Пуассона — взяты экспериментальные данные, полученные при изучении пористой керамики на основе диоксида циркония [3], при этом элементы, описывающие поведение поровых пространств, имеют значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, равные нулю.

На рис. 1 представлено распределение деформаций в пористом диоксиде циркония при полной деформации, равной 1%. Для изолированных, удаленных друг от друга пор характерно равномерное расположение изолиний, напротив, в местах скопления пор расстояние между изолиниями уменьшается, т.е. наблюдается локализация деформации. Характерно, что области локализации деформации, изображенные светлыми участками, располагаются под углом 45° к оси нагружения. При этом они фактически разделяют материал на отдельные фрагменты, средний размер которых хорошо согласуется со средним расстоянием между порами, измеренным экспериментально: если принять связность равной нулю (т.е. считать, что поры изолированы), то среднее расстояние между порами, рассчитанное в соответствии с [4] и равное $16.5 \mu\text{m}$, совпадает с экспериментально измеренной величиной, что может свидетельствовать о правильности расчета.

Распределение напряжений σ_y совпадает с распределением упругих деформаций. Локализация наблюдается как вблизи скопления пор, так и вдоль линий, параллельных оси нагружения, т.е. вблизи свободных боковых граней модели, что может соответствовать появлению „бочкообразной“ формы образца в реальном эксперименте.

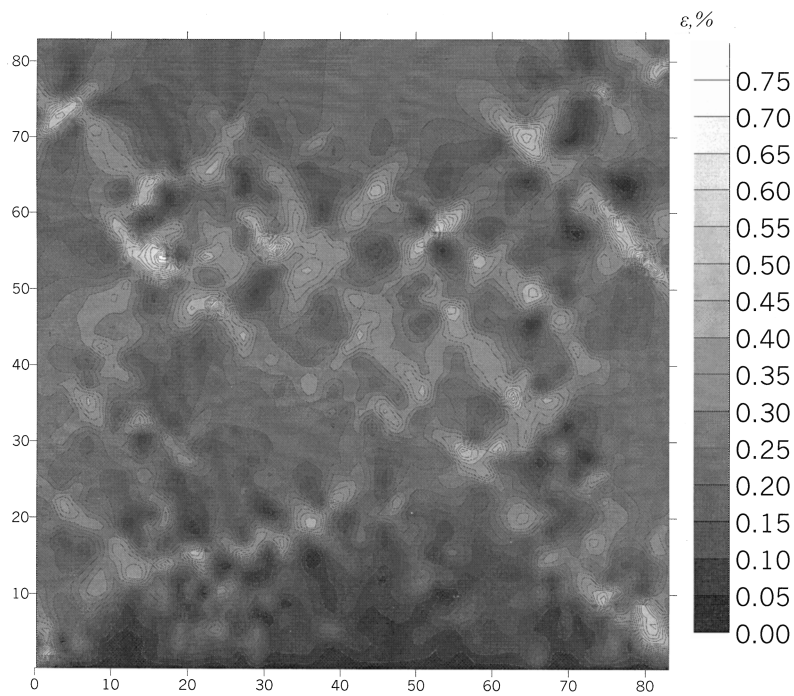


Рис. 1. Распределение деформаций (ϵ_x) в пористом диоксиде циркония.

Распределение интенсивности напряжений в пористом диоксиде циркония показывает, что вблизи пор формируются концентраторы напряжений, которые значительно превышают предел прочности материала на сжатие. Приняв интенсивность напряжений σ_i за инвариант, можно оценить „степень разрушения“ материала, рассчитав ту часть его объема, в которой σ_i превышает прочность, определенную экспериментально [3]. На рис. 2 кривая *I* показывает, что в пористом диоксиде циркония до деформации, равной 0.4%, все формирующиеся напряжения находятся ниже уровня, соответствующего пределу прочности, и разрушения не происходит. С ростом деформации начинается разрушение отдельных участков материала, где напряжения превышают предел прочности, и до деформации, равной 0.85%, наблюдается нелинейный

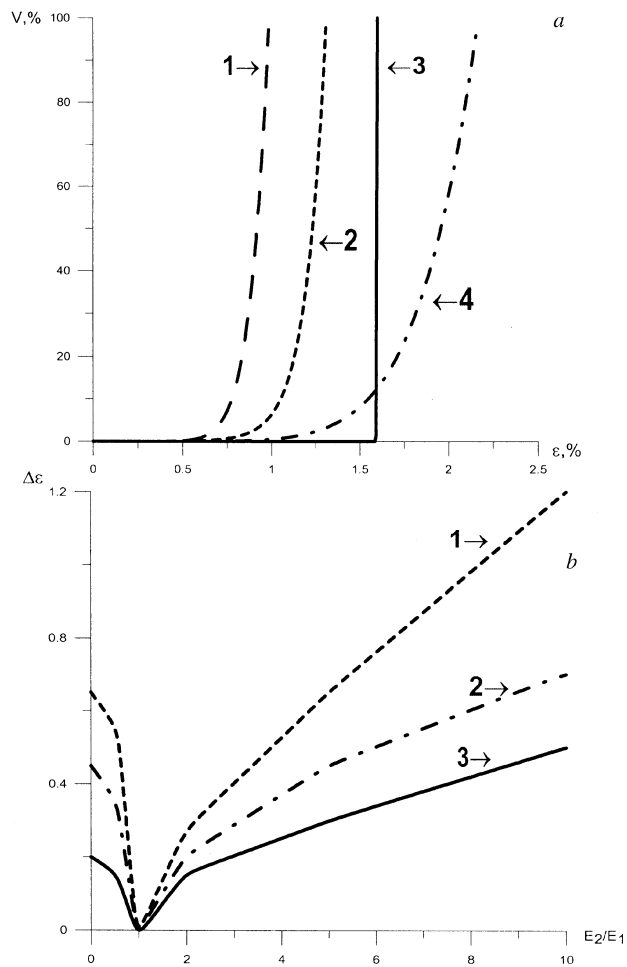


Рис. 2. *a* — зависимость объема разрушенного материала от полной деформации для: 1 — пористого материала, 2 — материала с „мягкими“ включениями — $E_i = 0.5E_m$, 3 — однородного материала, 4 — материала с „жесткими“ включениями — $E_i = 10E_m$ (E_m — модуль Юнга матрицы материала; E_i — модуль Юнга включения); *b* — зависимости полной деформации (1), нелинейной стадии (2) и линейной стадии (3) от соотношения модулей матрицы и упрочнителя.

механизм накопления объема разрушенного материала. Дальнейшее накопление микроповреждений происходит по линейному закону, и при общей деформации, равной 1%, напряжения во всей моделируемой области превышают предел прочности, т.е. разрушенным оказывается весь материал.

Данная расчетная схема использована для анализа поведения композита как с „мягкими“, так и с „жесткими“ включениями вместо пор, при этом прочность элементов, принадлежащих поровым пространствам, определяли значениями модуля Юнга, причем отношения модуля Юнга включения к модулю Юнга матрицы взяты в широком диапазоне значений — от 0 (поры) до 10 (твердые частицы).

Распределения напряжений в материале, полученном после заполнения пор материалом матрицы (случай абсолютно компактного материала), однородны; до деформации, равной 1.59%, материал деформируется равномерно и все σ_i в моделируемом объеме находятся ниже уровня, соответствующего пределу прочности на сжатие (рис. 2, кривая 3). Приращение деформации всего на 0.01% приводит к превышению этого значения, т.е. фактически к мгновенному разрушению материала.

Распределение линий равных деформаций в композите с прочными включениями более равномерное, чем аналогичные распределения при деформации пористого диоксида циркония. Вокруг включений изолинии расположены в виде замкнутых колец, повторяющих форму включений. Закономерностей в расположении изолиний в местах, отдаленных от неоднородностей, не наблюдается. Как и при деформации пористого материала, локализация деформации в композите происходит между включениями, и наблюдается фрагментация матрицы. Чтобы рассчитать долю разрушенного материала, был задан уровень, соответствующий пределу прочности композита, рассчитанный по правилу смеси [5]. Так же как и при деформации пористого диоксида циркония, кривые 2 и 4 можно условно разделить на три части: отсутствие разрушения, нелинейная и линейная стадии накопления объема разрушенного материала. Протяженность деформации на всех трех стадиях в материалах, для которых модуль Юнга включений меньше, чем у матрицы, уменьшается, а затем, с увеличением прочности включений, возрастает (рис. 2, *b*). Минимальное значение протяженности стадий накопления объема разрушенного материала наблюдается в однородном материале.

При нагружении структурно-неоднородных материалов формируются области локализации, разделяющие материал на фрагменты, средний

размер которых равен среднему расстоянию между неоднородностями. Выделяются три стадии деформации, на которых материал не испытывает локального разрушения, стадия нелинейного накопления разрушенного материала и стадия полного разрушения.

Список литературы

- [1] *Dillamore I.L., Roberts J.G., Bush A.C.* // *Metals Sci.* 1979. V. 13. N 2. P. 73–77.
- [2] *Cosmos/M*, Version 1.75 for Windows NT/95, platforms 10/96, SN2008788770670.
- [3] Буякова С.П., Хан Вей, Мельников А.Г., Кульков С.Н. // Письма в ЖТФ. Т. 25. № 17. С. 44–48.
- [4] *Werlefors T., Eskilsson C.* // *Metallography.* 1979. V. 12. P. 153–173.
- [5] *Физическое металловедение* // Под ред. О.В. Абрамова, А.В. Серебрякова. М.: Металлургия, 1987. Т. 2. С. 558.