

Численное исследование особенностей деформации и разрушения хрупких пористых сред на основе метода подвижных клеточных автоматов *

Иг.С. Коноваленко
e-mail: igkon@ispms.tsc.ru

А.Ю. Смолин
Н.В. Роман
С.Г. Псахье

*Учреждение Российской академии наук
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН*

В рамках метода подвижных клеточных автоматов проведено численное исследование особенностей деформации и разрушения хрупких пористых сред при одноосном сжатии и простом сдвиге. Рассматривались пористые образцы со стохастическим и регулярным пространственным распределением пор. На основе результатов моделирования показано влияние поровой структуры на скорость генерации и развития повреждений в образцах. Обнаружена корреляция эффективной жесткости пористых образцов и скорости накопления в них повреждений. Показано, что в зависимости от пористой структуры хрупкого материала его режим разрушения может меняться от хрупкого до квазивязкого, а скорость накопления в нем повреждений может иметь пороговый характер.

В настоящее время очень широкое применение в медицине, энергетике, машиностроении получили хрупкие пористые материалы, в том числе – спеченная керамика на основе оксидов металлов [1]. Это предъявляет строгие требования к ее физико-механическим свойствам, а также структуре порового пространства. Трудности экспериментального изучения деформации и разрушения пористых материалов связаны в первую очередь с получением образцов, обладающих заданной величиной пористости и структурой порового пространства, а также с невозможностью детально наблюдать и анализировать картину генерации и развития повреждений. Таким образом, компьютерное моделирование представляется весьма перспективным, для решения данных задач современного материаловедения. Несмотря на большое количество исследований, посвященных особенностям отклика и разрушения пористых материалов [1, 2, 3], вопрос взаимосвязи внутренней структуры материала с его физико-механическими характеристиками и поведением при разрушении в настоящее время остается изученным не до конца. В частности, представляет интерес понять влияние различных пространственных распределений пор в образцах на их прочностные и упругие характеристики, а также особенности их разрушения при механическом нагружении. Целью настоящей работы являлось теоретическое изучение отклика материалов со стохастической и регулярной структурой порового пространства при одноосном сжатии и простом сдвиге.

*Работа выполнена при поддержке гранта МК-5260.2010.8 Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук.

Изучение деформации и разрушения хрупких пористых сред при сдвиговом нагружении

На основе метода подвижных клеточных автоматов [4] моделировалось поведение пористых керамических (ZrO_2) образцов с различной структурой пор, как регулярной (рис. 1, а-г), так и стохастической (рис. 1, д). У всех образцов поры были вытянуты вдоль направления нагружения и имели одинаковые размеры. Величина пористости образцов составляла 25%, размеры образцов — 1.14×0.624 мм, размер автоматов — 0.01 мм. Нагрузка прикладывалась путем задания одинаковой скорости в горизонтальном направлении верхнему слою автоматов, а нижний слой был неподвижен. По горизонтальной оси использовались периодические граничные условия. Задача решалась в условиях плоской деформации. Функции отклика автоматов соответствовали диаграмме нагружения спеченной из нанокристаллического порошка керамики $ZrO_2(Y_2O_3)$ с пористостью 2% и средним размером пор, соизмеримым с размером зерна. Регулярность пористой структуры задавалась четырьмя способами: в первом случае поры в образце повторялись в вертикальном направлении с расстоянием, равным их высоте, а в горизонтальном направлении — равным их ширине. Располагаясь таким образом, поры образовывали вертикальные высокопористые слои материала, чередующиеся с монолитными слоями (рис. 1, а). Во втором, третьем и четвертом случаях поры в образцах были расположены в шахматном порядке (рис. 1, б, в, г соответственно). Разница между этими способами состояла в плотности генерируемых таким образом пор. В образце на рис. 1, д поры были распределены стохастически.

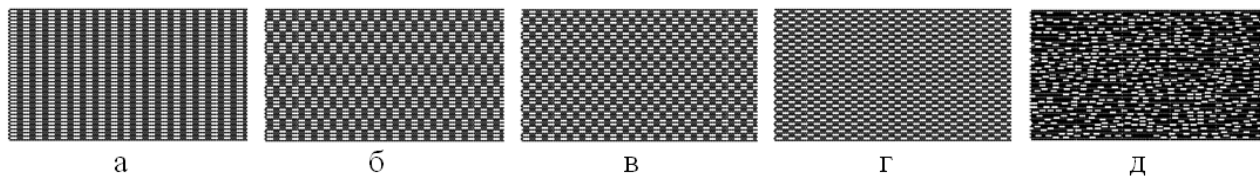


Рис. 1. Структура образцов с различным пространственным расположением пор: а-г регулярным, д – стохастическим

Диаграммы нагружения образцов представлены на рисунке 2, а. У образцов с регулярной поровой структурой (рис. 1, а-г) значения предельных сдвиговых напряжений и соответствующих им сдвиговых деформаций больше, по отношению к ним же у образца со стохастическим распределением пор (рис. 1, д). Образцы с регулярной поровой структурой обладают различными эффективными модулями сдвига при одинаковой пористости. Это связано с особенностями в пространственном расположении пор. У образцов с порами расположенными в шахматном порядке (рис. 1, б-г) эффективная жесткость возрастает с уменьшением количества пор в «клетке». Прочностные свойства образцов повышаются с увеличением их жесткости.

Скорость генерации повреждений в образце оценивалась по зависимости относительного количества разорванных в нем межэлементных связей от деформации сдвига (рис. 2, б). У образцов с периодической поровой структурой (кривые а-г) на кривых можно выделить несколько горизонтальных и восходящих участков. Первые восходящие участки соответствуют образованию повреждений по всему объему образцу без потери им целостности (образец б), в образцах (а, г, в) при этом образуются маги-

стральные трещины. Последующие восходящие участки кривых соответствуют распространению трещины (кривые в,г) или ее образованию (образец б).

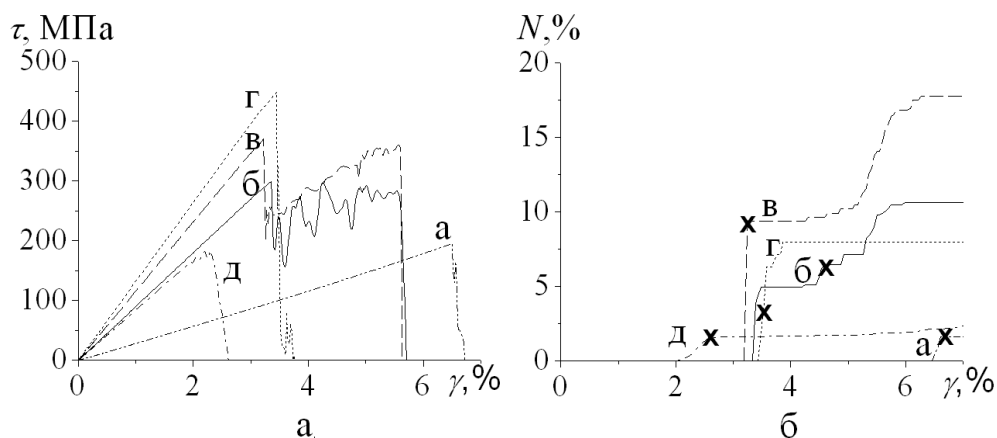


Рис. 2. Модельные зависимости: а – диаграммы нагружения образцов с различной поровой структурой; б – зависимость относительного числа разорванных межэлементных связей N в образце от его относительного сдвига γ . Кривые а–д соответствуют образцам на рис. 1. Момент образования в образце магистральной трещины на кривых отмечен крестом.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что в хрупких образцах с регулярной поровой структурой скорость накопления повреждений носит пороговый характер. Это полностью согласуется с экспериментальными данными о том, что после локального разрушения керамика продолжает деформироваться по прежнему закону [5].

Изучение деформации и разрушения пористых сред при сжатии

Рассмотрим поведение модельных образцов с указанными типами поровой структуры (рис. 1) и величиной пористости 25% при одноосном сжатии. Размеры образцов составляли 0.6×1.24 мм. Нагрузка прикладывалась путем задания одинаковой скорости в вертикальном направлении верхнему слою автоматов, нижний слой автоматов был жестко закреплен. Задача решалась в условиях плоской деформации.

Результаты моделирования показали, что образцы с регулярной пористой структурой (рис. 1, а–г) имеют более высокую прочность и эффективные упругие модули (рис. 3, а) по отношению к образцу со стохастическим распределением пор (рис. 1, д). Для образцов с порами, расположенными в шахматном порядке (рис. 1, б–г), наблюдается увеличение эффективной жесткости и прочностных характеристик, а также некоторое снижение предельной деформации (рис. 3, а), при увеличении количества пор входящих в «шахматную клетку». Заметим, что разным типам регулярной поровой структуры (рис. 1, а и рис. 1, б–г) соответствуют разные прочностные и упругие характеристики.

Скорость генерации и накопления повреждений количественно оценивалась на основе зависимости относительного числа разорванных в образце межэлементных связей от его относительной деформации (рис. 3, б). На каждой кривой можно выделить три участка. Первый характеризуется малым углом наклона и соответствует генерации и развитию первых одиночных повреждений. У образцов с регулярной поровой структу-

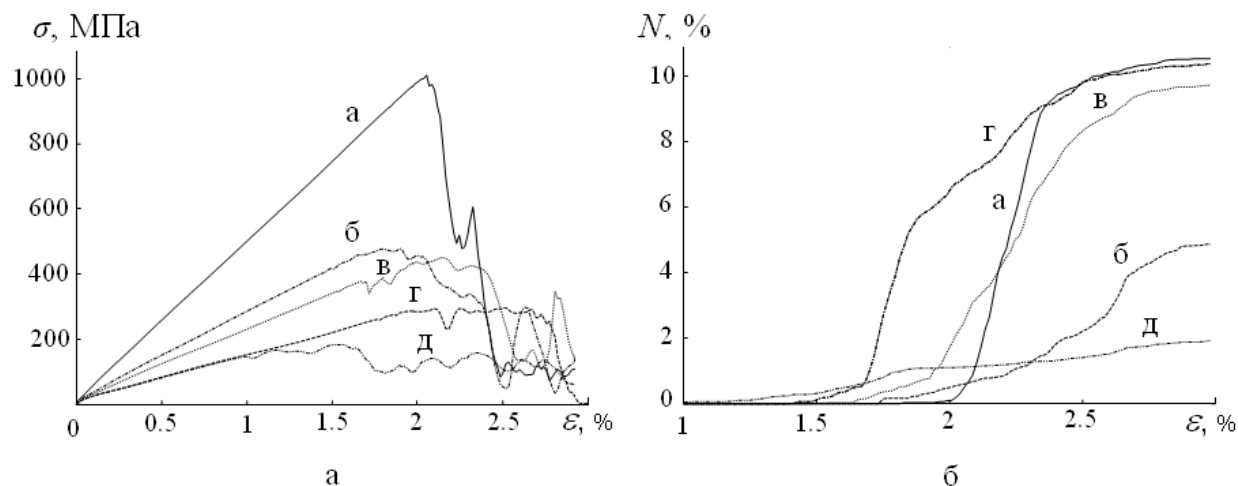


Рис. 3. Модельные зависимости: а – диаграммы нагружения образцов; б – зависимости относительного числа разорванных межэлементных связей N в образце от его относительной деформации ϵ . Обозначения кривых соответствуют образцам на рис. 1.

рой длина данного участка пропорциональна их эффективной жесткости, а скорость накопления повреждений обратно пропорциональна этой величине. На втором участке в образце происходит образование и развитие системы макротрещин. Он характеризуется наибольшей скоростью роста числа разорванных связей. Третий участок соответствует фрагментации образца. Заметим, что увеличение скорости накопления повреждений с уменьшением эффективной жесткости образцов наблюдается только при одинаковом типе их поровой структуры («в шахматку» рис. 1, б–г). Так, образцы на рис. 1, а,г обладая разными типами периодической поровой структуры и величинами эффективной жесткости, различающимися практически в 2 раза, тем не менее характеризуются почти одинаковыми скоростями накопления повреждений на второй стадии (рис. 3, б). Образец со стохастическим распределением пор проявляет существенно иную скорость накопления повреждений. Так наклон кривой д (рис. 3, б) на всем ее протяжении меняется незначительно, и вторая стадия, соответствующая распространению макротрещин в других образцах, здесь практически не выделяется. Общее количество разорванных связей при потере несущей способности такого образца в 5 раз меньше, чем для большинства других образцов.

Таким образом, показано, что в образцах со стохастической пористостью может отсутствовать фаза быстрого распространения магистральной трещины и резкого падения несущей способности, характерная для хрупкого разрушения. Это позволяет говорить о возможности квазивязкого разрушения хрупких сред, обусловленного исключительно структурой порового пространства.

Работа выполнена при поддержке гранта МК-5260.2010.8 Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук.

Список литературы

- [1] Global Roadmap for Ceramics: Proceedings of 2nd International congress on ceramics (ICC2). Edited by Alida Belosi and Gian Nicola Babini. Institute of Science and Technology for Ceramics,

National Research Council, Verona (Italy), 2008. 833 p.

- [2] БУЯКОВА С.П. Свойства, структура, фазовый состав и закономерности формирования пористых наносистем на основе ZrO_2 : дис. ... докт. техн. наук. Томск, 2008. 309 с.
- [3] КУЛЬКОВ С.Н., БУЯКОВА С.П., МАСЛОВСКИЙ В.И. Структура, фазовый состав и механические свойства керамик на основе диоксида циркония // Вестник Томского государственного университета. 2003. № 13. С. 34-57.
- [4] ПСАХЬЕ С.Г., ДМИТРИЕВ А.И. ШИЛЬКО Е.В. и др. Метод подвижных клеточных автоматов как новое направление дискретной вычислительной механики. I. Теоретическое описание // Физическая мезомеханика. 2000. Т.3, №2. С. 5-13.
- [5] С.Н. КУЛЬКОВ, С.П. БУЯКОВА, С.В. ПАНИН Формирование поверхностных структур при деформации пористых непластичных сред // Физическая мезомеханика. Спец. выпуск. 2006. Т. 9. С. 83-86