

УДК 539.4.015,539.42,539.422.3

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ КЕРАМИКИ И НАНОКОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

© 2011 г.

В.В. Скрипняк, Е.Г. Скрипняк

Томский госуниверситет

skrp@ftf.tsu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Представлены результаты компьютерного моделирования деформации и разрушения пористых керамических материалов на мезоскопическом уровне при интенсивном динамическом нагружении. Предложен метод теоретической оценки эффективных модулей упругости керамических материалов со структурой пористости без использования гипотез относительно связи модулей с пористостью. Показано, что наличие поровой структуры препятствует формированию в керамике волны разрушения.

Ключевые слова: конструкционная керамика, керамические наноккомпозиты, поровая структура, динамическое нагружение, волна разрушения.

Изучение механизмов формирования волн разрушения в хрупких средах остается актуальным как в теоретическом, так и практическом аспекте. До настоящего времени не получено однозначных экспериментальных подтверждений возможности образования волны разрушения в хрупких керамических материалах [1]. Экспериментальные исследования [1, 2] выявили, что под действием импульсных воздействий с амплитудами ниже предела упругости Гюгонио в керамических материалах на основе оксида алюминия и диоксида циркония развиваются повреждения структуры. Было установлено, что повреждения появляются в керамических материалах не только под действием импульсов растягивающих напряжений, но и при ударном сжатии. Кинетика и закономерности формирования фрагментов керамических материалов в процессе динамического нагружения изучены недостаточно хорошо.

Представлены результаты анализа динамики слабых ударных волн в ультрамелкозернистой Al_2O_3 , $ZrO_2-Y_2O_3$ керамике. Методом компьютерного моделирования исследованы процессы деформации и разрушения керамических материалов с различными поровыми структурами при воздействии ударных импульсов с амплитудами от 5 до 10 ГПа [3–7]. Моделирование проводилось в рамках подхода вычислительной механики материалов.

Анализ результатов моделирования показал, что при воздействии ударных волн на однофазную пористую Al_2O_3 керамику происходит коллапс пор и фрагментация конденсированной фазы. Изменение формы и объема пор на разных стадиях коллапса во фронте ударной волны можно видеть на рис. 1. Коллапс пор связан с фрагментацией конденсированной фазы материала вокруг пор и движением фрагментов в полость пор.

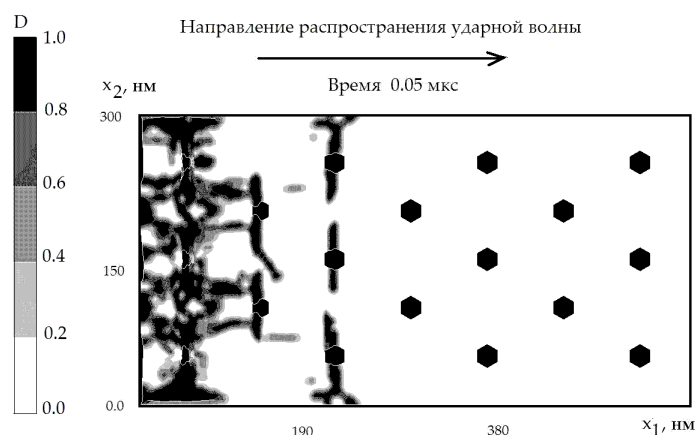


Рис. 1. Распределение параметра поврежденности конденсированной фазы в модельном объеме керамики при ударно-волновом воздействии

Очаги разрушения зарождаются в области концентраторов напряжений. Области поврежденных имеют три характерные ориентации – вдоль, поперек и под углами, близкими 45° к направлению распространения ударной волны. Формирование областей, имеющих поперечную ориентацию, обусловлено изменением формы пор и сопровождается резким ростом поврежденности в конденсированной фазе. Под действием градиента гидростатического давления во фронте протекает трансформация формы пор из сферической в эллипсоидную и далее в дискообразную. Изменение формы пор вызывает резкое увеличение концентрации напряжений в плоскости, ортогональной направлению распространения волны. Локальная релаксация давлений вызывает появление градиентов массовой скорости в направлении, ортогональном направлению распространения волны. Появление распределения массовых скоростей в зоне ударного перехода приводит к формированию поврежденных областей конденсированной фазы, ориентированных параллельно направлению распространения волны.

В зоне разрушения происходит фрагментация керамики, сопровождающаяся сдвигом и разворотом блоков. Размеры фрагментов в ударно-нагруженной пористой керамике оказываются меньше среднего расстояния между порами. Движение блоков происходит под действием нестационарных и неоднородных полей напряжений.

Во фронте упругого предвестника существенного изменения формы и размеров пор не происходит. Поры являются структурными концентраторами напряжений на мезоскопическом уровне. Усредненная скорость распространения упругого предвестника в пористой керамике ниже, чем в конденсированной фазе материала. Уменьшение средней скорости упругой волны является результатом взаимодействия волны нагружения с поверхностью пор. В результате этих взаимодействий происходит образование волн упругой разгрузки.

Наличие пор в структуре материала приводит не только к формированию неоднородного поля напряжений, но и вызывает осцилляции напряжений во времени. Аналогичный осциллирующий характер имеют зависимости локальных значений массовой скорости от времени. Подобные осцилляции наблюдались в пористых керамических материалах на основе Al_2O_3 , $ZrO_2-Y_2O_3$ при реги-

страции профилей ударных волн на тыльной поверхности мишеней с помощью лазерных дифференциальных интерферометров [2]. В области упругого предвестника осцилляции параметров механического состояния обусловлены взаимодействием волн разгрузки, образовавшихся при отражении волны нагружения от поверхностей пор. Во фронте волны объемного сжатия осцилляции появляются в результате релаксации сдвиговых напряжений, обусловленных развитием неупругих деформаций и ростом повреждений в конденсированной фазе. Релаксация средних сдвиговых напряжений начинается с момента зарождения повреждений вблизи пор. Зарождение повреждений происходит под действием сдвиговых напряжений, величина которых может существенно отличаться от эффективных значений.

Процесс фрагментации материалов в зоне разрушения определяется сдвигом и разворотом образовавшихся блоков, разделенных трещинами и полосами локализованной деформации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №08-08-12055), Минобрнауки РФ АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проекты 2.1.1/13521, 2.1.2/13526), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГК № П 1247 от 07.06.2010).

Список литературы

1. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 402 с.
2. Разоренов С.В. и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Томск: Изд-во Томс. ун-та. 2002. С. 182–186.
3. Скрипняк Е.Г. и др. // Вестник Томского гос. ун-та. 2010. Т. 10, №2. С. 94–101.
4. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Коробенков М.В., Скрипняк В.В. // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности: Сб. Материалов Ч. 2. Санкт-Петербург, 13–15 апреля 2010. СПб. 2010. С. 178–181.
5. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Козулин А.А., Скрипняк В.В. // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52, №12. С. 38–41.
6. Скрипняк В.А. и др. // Известия Томс. политехн. ун-та. 2009. Т. 315, №2. С. 113–117.
7. Скрипняк Е.Г. и др. Моделирование процесса развития повреждений в наноструктурной керамике при интенсивных импульсных воздействиях // Изв. вузов. Физика. №7/2. С. 195–202.

**DEFORMATION AND FRACTURE OF CERAMICS AND CERAMIC NANOCOMPOSITES
AT DYNAMIC LOADING**

V.V. Skripnyak, E.G. Skripnyak

Results of computer simulation of deformation and fracture of ceramic materials on the meso-scale level under dynamic loading are presented. The method of theoretical prediction of the effective modules of elasticity of ceramic materials with a porous structure without using the hypotheses concerning relation of modules with porosity is presented. It is shown the porous structure impedes the formation of a fracture wave in ceramics.

Keywords: constructional ceramics, ceramic nanocomposites, voids structure, dynamic loading, fracture wave.