

01;05.1

## **Вихревые структуры в керамике при высокоскоростном ударе**

© В.А. Горельский, С.А. Зелепугин

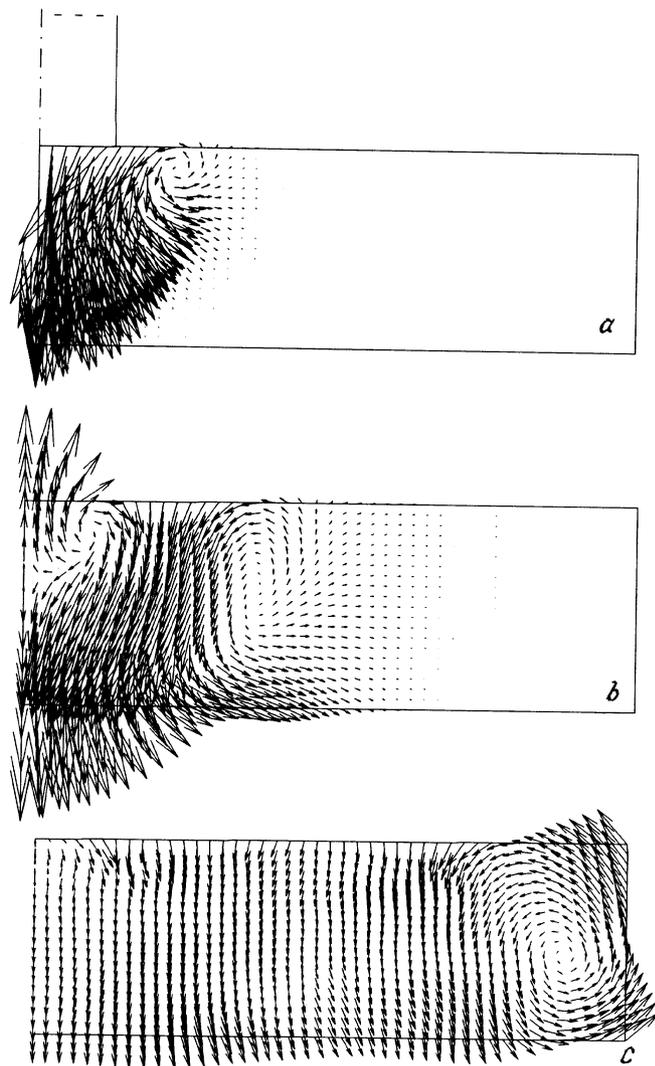
Томский филиал Института структурной макрокинетики РАН

*Поступило в Редакцию 11 апреля 1997 г.*

Методом конечных элементов в двумерной осесимметричной постановке анализируются особенности ударно-волновых процессов в керамической пластине при ударе по ней быстролетящим цилиндром. Установлено возникновение вихревой структуры, прослежены эволюции вихрей.

В настоящее время в исследованиях поведения керамик при динамическом нагружении преобладают экспериментальные работы [1,2], а для расчетных оценок используются в основном упрощенные модели и подходы. Но только анализ с использованием численного моделирования [3,4] позволяет в рамках единой математической модели исследовать процесс высокоскоростного нагружения керамических преград в широком диапазоне начальных условий. В работе методом конечных элементов в двумерной осесимметричной постановке анализируются особенности ударно-волновых процессов в керамической пластине при ударе по ней быстролетящим цилиндром. В расчетах используется модель повреждаемой среды, отличающаяся возможностью зарождения и развития в ней трещин [3]. Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические движения сжимаемой среды, включает уравнения неразрывности, движения, энергии, изменения удельного объема трещин [5].

Рассматривается нагружение керамической пластины толщиной 10 mm и диаметром 60 mm стальным цилиндрическим ударником диаметром 7.6 mm и высотой 25 mm. На контактной поверхности ударника с пластиной реализованы условия скольжения; начальная скорость ударника в расчетах варьировалась в пределах 100–1500 m/s. Константы математической модели для керамики взяты из [3]. На рисунке представлены поля скоростей в радиальном сечении керамической пластины и часть контура ударника (ось симметрии расположена слева).



Поле скоростей в радиальном сечении керамической пластины в различные моменты времени:  $a - t = 0.7 \mu s$ ,  $b - t = 1.8 \mu s$ ,  $c - t = 6 \mu s$ , начальная скорость удара 100 м/с.

При нагружении со скоростью удара 100 м/с в керамической пластине образуется волна сжатия, распространяющаяся в направлении тыльной и боковой поверхностей. Одновременно на свободной поверхности рядом с ударником возникает волна разрежения. Взаимодействие этих двух волн на начальном этапе процесса приводит к формированию вихревой структуры, расположенной в приповерхностном лицевом слое материала керамической пластины. Рисунок, *a* иллюстрирует смещение этого вихря вдоль пластины. В пластине можно условно выделить основную область наиболее активного воздействия со стороны ударника, радиус которой составляет примерно 3–4 радиуса ударника, и остальную, периферийную область. В основной области на начальном этапе процесса между лицевой и тыльной поверхностями наблюдается распространение и взаимодействие волн сжатия и разрежения. При этом в данной области с течением времени формируются новые вихревые структуры. Так, рисунок, *b* иллюстрирует возникновение вихря в приповерхностном слое керамической пластины под ударником, обусловленное выходом волны разрежения на лицевую поверхность.

Интересно проследить эволюцию первого вихря. Он продолжает смещаться вдоль пластины, одновременно перемещаясь вглубь. В момент времени 1.8  $\mu$ s (см. рисунок, *b*) центр данной структуры располагается примерно в срединном слое керамической пластины. В дальнейшем, продолжая смещаться вдоль пластины к ее боковой поверхности, центр вихря к 4  $\mu$ s выходит к тыльной поверхности пластины. Перемещаясь затем в срединные слои, вихрь к 5.5  $\mu$ s выходит к ее боковой поверхности. Рисунок, *c* иллюстрирует момент наибольшего развития данной вихревой структуры, охватывающей всю толщину керамической пластины. Центр вихря находится в срединных слоях пластины и отстоит от ее боковой поверхности примерно на половину толщины. Максимальное значение скорости в этой области достигает 16.4 м/с к моменту времени 6.5  $\mu$ s, что составляет достаточно заметную величину относительно начальной скорости удара. После 8  $\mu$ s там же наблюдается кратковременное, длительностью около 1  $\mu$ s, формирование слабовыраженного "антивихря", в котором векторы скоростей направлены в противоположную сторону. В дальнейшем поле скоростей в пластине выравнивается и процесс продолжается движением ударника и пластины как единого целого.

Анализ расчетов показывает, что основным вихреобразующим фактором является распространение в керамической пластине волн давления,

имеющих разные знаки. Возникающая в начальный момент процесса волна разрежения локализуется в лицевых поверхностных слоях пластины и перемещается в ходе процесса к ее боковой поверхности. Волна сжатия после выхода на тыльную поверхность пластины начинает перемещаться вдоль тыльной поверхности в том же направлении. Именно выход этих двух взаимно противоположных волн к боковой поверхности преграды вызывает развитие вихревой структуры, показанной на рисунке, *с*. Изменение начальных параметров, таких как геометрические размеры, скорость удара, оказывает существенное влияние на формирование вихревых структур. Уменьшение радиуса пластины вдвое при сохранении размера расчетных элементов приводит к усилению взаимного влияния процессов в основной и периферийной областях. Вихревая структура в области боковой поверхности пластины наблюдается уже в период времени 2–3.3  $\mu\text{s}$ . Влияние периферийной области на основную проявляется в формировании в период времени 5.9–6.5  $\mu\text{s}$  мощной вихревой структуры в керамике под ударником, ранее не наблюдавшейся. В целом волновые процессы в этом случае протекают более интенсивно из-за отражения волн от боковой поверхности пластины. При увеличении радиуса пластины вдвое в ней на том же расстоянии от оси симметрии образуется вихрь, подобный показанному на рисунке, *с*, что свидетельствует об основной роли волнового фактора в формировании вихревых структур. Отсутствие в данном случае влияния боковой поверхности пластины проявляется в почти вдвое меньших максимальных значениях скоростей в вихре, а также в перемещении его центра вдоль пластины, чему ранее препятствовала ее боковая поверхность. С увеличением начальной скорости удара процесс образования вихревых структур в керамике существенно меняется. Если при скорости 300 м/с наблюдается качественное подобие выше рассмотренному процессу, то при скорости 600 м/с и выше волна разрежения вблизи лицевой поверхности в начальный период процесса подавляется и вихревая структура, подобная представленной на рисунке, *а*, не формируется. Однако вихрь, подобный показанному на рисунке, *с*, возникает в керамике во всем исследованном диапазоне скоростей удара. При скоростях выше 600 м/с центр данного вихря становится подвижным, а продолжительность его существования возрастает на 1–1.5  $\mu\text{s}$ . С ростом скорости относительная величина максимального значения скорости в вихре падает, составляя при 300 м/с — 10.2%, при 600 м/с — 7.4%, 1000 м/с — 6.6% от начальной скорости удара. При использовании

стальной пластины тех же размеров не наблюдается областей со столь же ярко выраженным вихревым движением материала. Вихрь в области боковой поверхности, наиболее выраженная вихревая структура в керамике, в стальной пластине не формируется вообще.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 96-03-33659 и № 97-01-00218).

## Список литературы

- [1] Лазарев В.Б., Баланкин А.С., Изотов А.Д., Кожушко А.А. Структурная устойчивость и динамическая прочность неорганических материалов. М.: Наука, 1993. 176 с.
- [2] Bless S.J., Rosenberg Z., Yoon B. // Int. J. Impact Engng. 1987. V. 5. P. 165–171.
- [3] Горельский В.А., Зелепугин С.А. // Проблемы прочности. 1995. № 5–6. С. 87–94.
- [4] Johnson G.R., Holmquist T. In EXPLOMET 90, "Shock waves and high strain rate phenomena in materials" / Eds. M.A. Meyers, L.E. Murr, K.P. Staudhammer. Marcel Dekker Publishers, 1992. P. 1075–1081.
- [5] Горельский В.А., Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф. // Изв. АН. МТТ. 1994. № 5. С. 121–130.