

УДК 539.3

*М. А. Козлова, М. Н. Кривошеина, С. В. Кобенко***Численное моделирование искусственного откола***M. A. Kozlova, M. N. Krivosheina, S. V. Kobenko***Numerical Simulation of Artificial Spalling**

Все известные экспериментальные методы исследования откольных явлений дают лишь косвенную информацию о процессе разрушения и возникающих напряжениях. Динамические измерения во время ударного нагружения дают более полные данные о напряжениях, возникающих в преграде при откольном разрушении, но и в этом случае значения высоких растягивающих напряжений, возникающих внутри преграды, находят на основе параметров деформирования, измеряемых на свободной поверхности преграды, удаленной на толщину откольного слоя. С помощью численного моделирования процесса откольного разрушения возможно исследовать характеристики эксплуатационных свойств материалов и, в частности, откольную прочность. В данной работе представлены результаты численного моделирования контактного взаимодействия деформируемого стального ударника со стальной составной преградой. Проведен сравнительный анализ влияния величины зазора в составной преграде на ее напряженно-деформированное состояние в условиях динамической нагрузки. Скорость ударного нагружения составляла 260 м/с. Максимальная величина зазора между пластинами преграды 0,12 мм. Зазор порядка нескольких микрометров можно рассматривать как дефект, возникший вследствие предыдущего ударного нагружения преграды. Таким образом, численное моделирование искусственного откола позволяет выявить особенности разрушения преград с имеющимися откольными трещинами. Проведенные расчеты были сопоставлены с натурными экспериментами.

**Ключевые слова:** численное моделирование, упругопластическое деформирование среды, откольное разрушение.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-13

При экспериментальном изучении процессов высокоскоростного деформирования и откольного разрушения материалов основным измеряемым параметром является скорость свободной поверхности преграды. Поскольку информация, получаемая в экспериментах по отколу, в большинстве случаев относится не к сечению, где происходит разрушение, а к свободной поверхности преграды, то существует необходимость в компьютерном моделировании таких процессов разрушения.

All well-known experimental methods for studying phenomena of spalling provide only indirect information about destruction process and stresses. More complete data on target stresses during spalling can be obtained from dynamic measurements under shock loading. However, in this case the high tensile stresses are estimated via deformation parameters measured on a target free surface distanced by the thickness of spall layer. Numerical simulations of spalling allow performance properties and, in particular, spallation strengths of materials to be evaluated. In this work, numerical simulation results of contact interaction of a deformable steel impactor and a steel composite target are presented. An effect of gap width in the composite target on its stress strain state under dynamic loading is investigated. Impact velocity is set at 260 m/s, and maximum gap width between plates of the target is set at 0.12 mm. The gap width of several micrometers is considered as a defect caused by a previous shock loading. Thus, numerical simulation of artificial spalling allows to evaluate fracture and destruction parameters for targets with spall cracks from previous shock loading. Results of the simulation have good correspondence with results of real experiments.

**Key words:** numerical modeling, elastoplastic deformation of the medium, spall fracture

В работе проведено моделирование искусственного откола в металлической составной преграде под действием ударной нагрузки, что позволяет рассмотреть особенности деформирования преград при наличии в них трещин различной ширины — от 0 до 0,12 мм.

Решалась система уравнений в рамках механики сплошной среды [1, с. 309]. Деформирование материала ударника и преграды проведено в рамках модели Прандтля-Рейсса. Численное моделирование реализо-

вано в трехмерной постановке методом конечных элементов, модифицированным Г. Р. Джонсоном для динамических задач, с помощью созданной авторами численной методики.

Начальные условия — ненапряженное состояние материалов ударника и преграды. На границе контакта ударника и преграды, а также между составными частями преграды реализовано условие скольжения без трения. В случае наличия зазора между составными частями преграды на поверхностях задавались условия свободной границы.

Проведенные расчеты были соотнесены с натурными экспериментами [2, с. 82]. Ударное нагружение стальной составной преграды толщиной 10 мм и диаметром 90 мм проводилось стальным цилиндрическим ударником высотой 5 мм и диаметром 76 мм. Скорость ударного нагружения  $v_0 = 260$  м/с. Материал ударника и преград в натурных экспериментах и расчетах — сталь ЭИ712.

Приведены результаты численного моделирования искусственного откола с тремя видами гранич-

ных условий: в первой задаче преграда состояла из двух пластин по 5 мм каждая, зазор между пластинами отсутствовал. Во второй и третьей преграды состояли из двух пластин с толщинами по 4,94 мм, зазоры составляли в начальный момент времени 0,06 и 0,12 мм.

В случае составной преграды без зазора кривые изменения скорости в точках на оси симметрии, принадлежащих тыльной поверхности верхней части преграды и верхней, контактной, поверхности нижней части составной преграды, показаны на рисунке 1а, а в точках на контактных поверхностях между ударником и верхней частью составной преграды — на рисунке 1б. Из рисунка видно, что волна сжатия распространяется в материале составной преграды, не «чувствуя» зазора. Прохождение уже отраженных волн растяжения через контактную поверхность приводит к искусственному отколу. Отскок ударника происходит в момент, когда волна растяжения пройдет через преграду и достигнет материала ударника (рис. 1б).

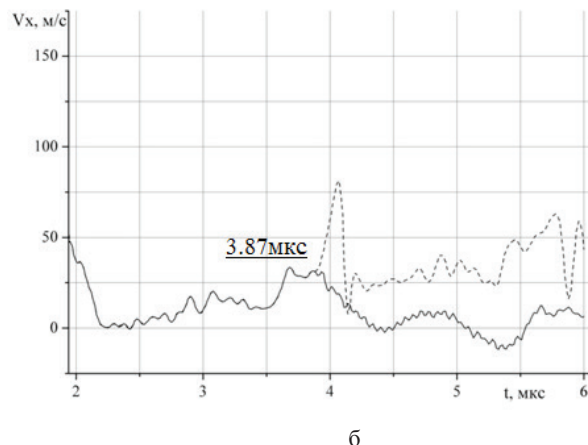
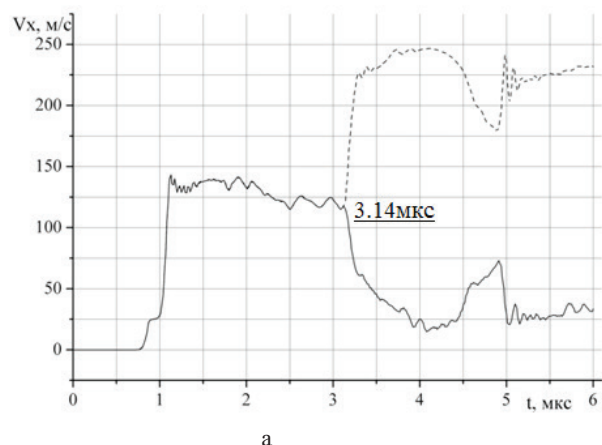


Рис. 1. Изменение скорости  $V_x$  при искусственном отколе без зазора: а — на поверхностях между верхней (сплошная линия) и нижней (штриховая линия) пластинами преграды; б — в зоне контакта: ударника — (сплошная линия) и верхней пластины преграды — (штриховая линия);  $v_0 = 260$  м/с

При наличии зазора между составными частями преграды 0,06 мм происходит смыкание внутренних поверхностей преграды (рис. 2а) в течение 0,24 мкс. Выход упругого предвестника на свободную поверхность верхней части преграды также отражен на графике (рис. 2а). В отличие от преграды без зазора, в данном случае наблюдается после отскока ударника от преграды (в 2,05 мкс) повторное взаимодействие (с 2,88 до 5,32 мкс) ударника и преграды (рис. 2б) и увеличивается общее время взаимодействия ударника и преграды по сравнению с преградой без зазора.

Третий численный эксперимент показал, что увеличение зазора между частями преграды до 0,12 мм приводит к увеличению времени выхода волны сжатия на свободную поверхность верхней части пре-

грады (рис. 2а — 3а). Отраженной волны растяжения от свободной поверхности в материале верхней части преграды достаточно, чтобы при встрече с волной растяжения, распространяющейся от свободной поверхности ударника, произошло полное отделение ударника (рис. 3б).

Несмотря на то, что после возникшего контакта обеих частей преграды большая часть волны сжатия продолжила распространение в нижнюю часть преграды, наличие нижней части преграды не повлияло на время отскока ударника. Наличие и величина зазора между пластинами, составляющими преграду в начальный момент времени, приводят к изменению напряженно-деформированного состояния преграды.

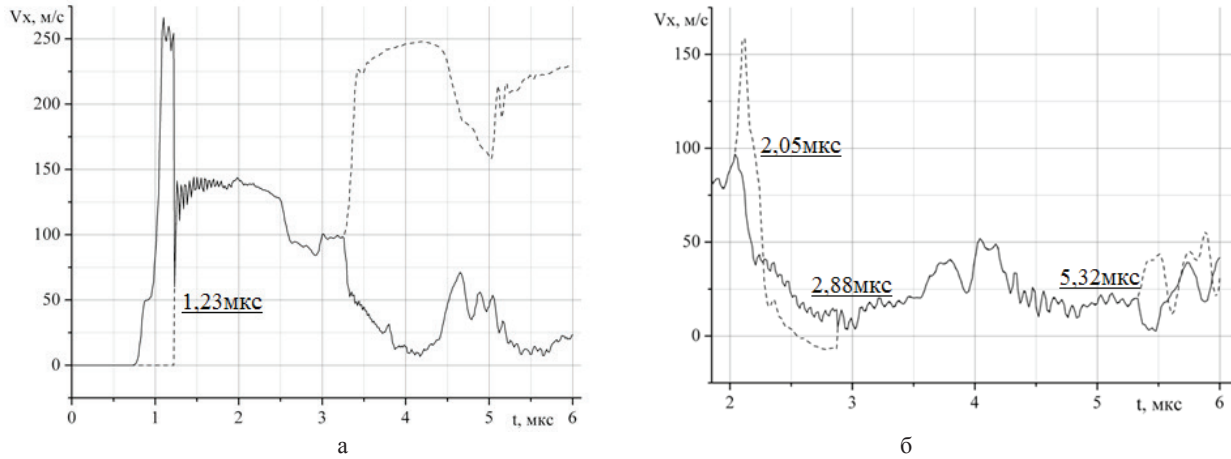


Рис. 2. Изменение скорости  $V_x$  при искусственном отколе с зазором 0,06 мм: а — на поверхностях между верхней (сплошная линия) и нижней (штриховая линия) пластинами преграды; б — в зоне контакта: ударника — (сплошная линия) и верхней пластины преграды — (штриховая линия),  $v_0 = 260$  м/с

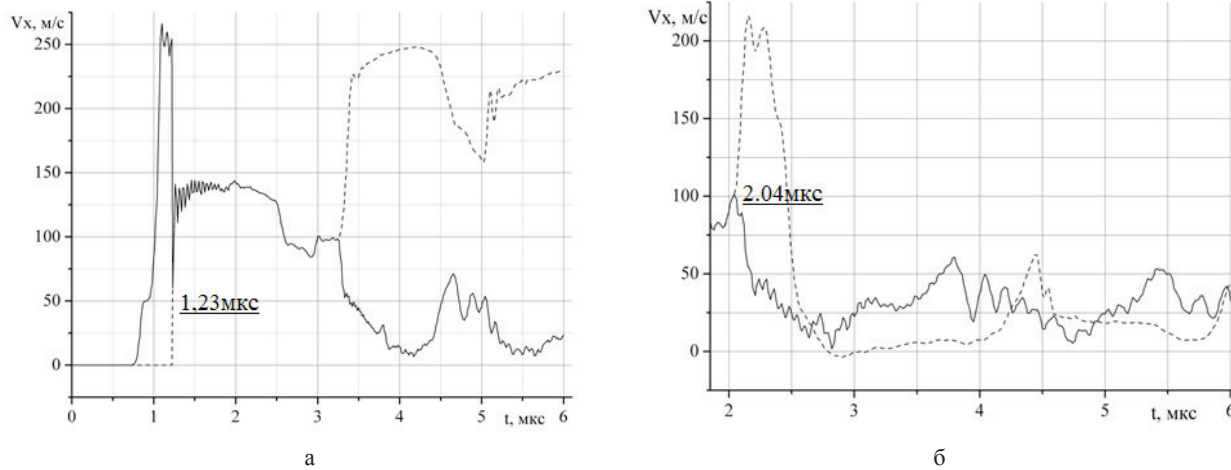


Рис. 3. Изменение скорости  $V_x$  при искусственном отколе с зазором 0,12 мм: а — на поверхностях между верхней (сплошная линия) и нижней (штриховая линия) пластинами преграды; б — в зоне контакта: ударника — (сплошная линия) и верхней пластины преграды — (штриховая линия),  $u_0 = 260$  м/с

Проведен сравнительный анализ зависимостей распределения полных напряжений в направлении удара в системе «составная преграда — ударник». Кривые на рисунке 4 демонстрируют распределения компонент полных напряжений в направлении удара вдоль оси ударника и преград с зазорами 0,06 и 0,12 мм в различные моменты времени. Сплошная линия соответствует распределению компоненты полных напряжений в направлении удара в преграде с зазором 0,12 мм в момент времени 2,03 мкс, сплошная с ромбами — в преграде с зазором 0,06 мм в тот же момент времени 2,03 мкс и штриховая линия — также для преграды с зазором 0,06 мм, но в момент времени 1,79 мкс. В сумме высота преграды и ударника составляет 15 мм — от 0 до 10 мм расположена преграда (от 0 до 5 мм нижняя часть преграды и от 5 до 10 мм верхняя часть) и от 10 до 15 мм расположен ударник. Момент времени 2,03 мкс пред-

шествует времени отделения ударника от преграды, имеющей зазор 0,12 мм, а 1,79 мкс соответствует такому же уровню взаимодействия частей преграды с зазором 0,06 мм. Время возникновения контакта частей преграды в этом случае меньше на 0,24 мкс. В момент времени 1,79 мкс в зоне контакта ударника и преграды имеются только сжимающие полные напряжения (штриховая линия), и части отраженной волны растяжения недостаточно для окончательного отскока ударника от преграды. В момент времени 2,03 мкс в зоне контакта ударника и преграды возникают растягивающие напряжения (сплошная линия), но их значения втрое выше, чем значения напряжений, показанные сплошной линией с ромбами в то же время. Таким образом, это является причиной окончательного отскока ударника в 2,04 мкс в момент времени для преграды с зазором 0,12 мм, что показано на рисунке 3б.

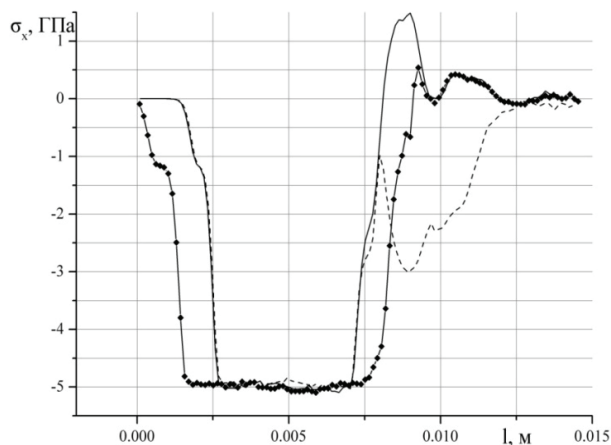


Рис. 4. Распределение компоненты полных напряжений в направлении удара вдоль оси ударника и преград с искусственным отколом,  $v_0 = 260$  м/с

Таким образом, величина начального зазора между частями преграды влияет на время взаимодействия ударника и преграды: в составной преграде с отсутствием зазора между двумя частями преграды время отскока ударника от преграды соответствует случаю отскока ударника от сплошной преграды; наличие зазора величиной 0,06 м приводит к увеличению времени взаимодействия ударника и преграды по сравнению с преградой без зазора; увеличение зазора до 0,12 мм приводит сначала к отделению ударника от преграды, а затем к возникновению откола.

**Вывод.** Изменение величины начального зазора между частями преграды влияет существенным образом на время отскока ударника, т. е. на время взаимодействия ударника и преграды и время возникновения откола в преграде.

### Библиографический список

1. Седов Л.И. Механика сплошных сред. — М., 1976. — Т. 2.
2. Иванов А.Г., Клещевников О.А., Цыпкин В.И., Минеев В.Н. Откол в стали // ФГВ. — 1981.