

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ВНЕДРЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. А. Горельский, И. Е. Хорев, Н. Т. Югов
(Томск)

Исследование задач высокоэнергетического контакта твердых тел, способных испытывать большие пластические деформации при динамическом взаимодействии, представляет собой сложную и актуальную проблему механики сплошной среды. Применяемые в настоящее время экспериментальные методики позволяют регистрировать лишь конечные результаты процесса разрушения объемных металлических тел, не давая возможности выяснить динамику развития структуры повреждений. В этом случае большую роль приобретает численное моделирование реализующихся пространственных течений и разрушения металлических тел, пластичность которых в условиях интенсивного динамического нагружения резко возрастает [1]. Наиболее обоснован для расчета разрушений в условиях удара феноменологический подход, основанный на введении в качестве непрерывной меры разрушения удельного объема трещин (объема трещин в единице массы материала).

Использованный в настоящей работе для моделирования разрушения функциональный вид кинетического соотношения [2] выбран таким образом, чтобы при малых напряжениях из него следовала известная экспоненциальная зависимость долговечности образца от нагрузки [3], а при больших напряжениях имела более слабая зависимость, как это наблюдалось экспериментально [4]. Константы кинетической модели разрушения определялись на основе экспериментальных данных, полученных в широком диапазоне условий нагружения. Для ряда материалов они приведены в работах [2, 5]. Трехмерная задача высокоскоростного взаимодействия цилиндрических тел и их разрушения исследовалась численным методом конечных элементов [6]. Используемая модель материала представляла собой сжимаемую упругопластическую среду, свойства которой по мере развития повреждений непрерывно изменялись [7].

Рассматривалась задача несимметричного взаимодействия цилиндра диаметром $d = 12,5$ и высотой $h = 37,5$ мм с пластиной конечной толщины (10 мм). Относительная скорость встречи $v_0/a_0 = 0,294$, где a_0 — скорость звука в исследуемом материале. Угол между нормалью к лицевой поверхности пластины и вектором скорости $\varphi = 15^\circ$. На контактной границе взаимодействующих стальных тел в расчетах заданы условия слияния. Расчетные конфигурации внедряющегося цилиндрического ударника и пластины в момент времени $t = 16$ мкс после начала взаимодействия приведены на рис. 1. Видно, что внедрение ударника сопровождается особенно интенсивным течением материала пластины из формируемого кратера к лицевой его поверхности в направлении горизонтальной скорости движения цилиндра. На рис. 2 представлены отдельно ударник и сечение образованного им кратера, которые иллюстрируют существенно

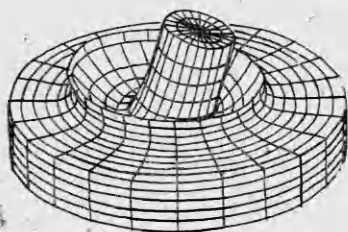


Рис. 1.

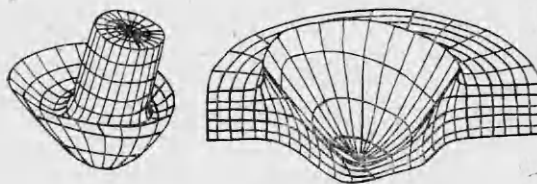


Рис. 2.

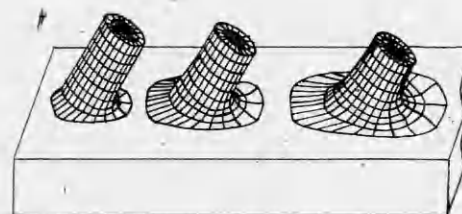
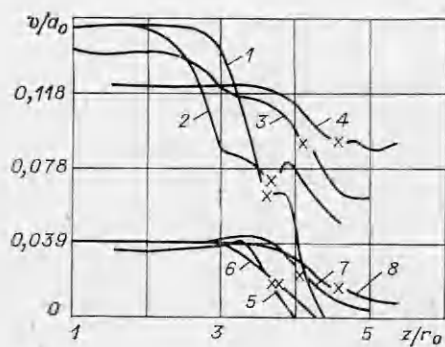


Рис. 5.

Рис. 3.



Рис. 4.

несимметричный характер процесса деформирования соударяющихся тел. Передняя часть контактной поверхности ударника имеет форму, близкую к полусферической, причем контактная поверхность ударника к $t = 16$ мкс уже выходит за начальную плоскость тыльной поверхности пластины. Анализ показывает, что в данном случае перфорация пластины происходит в основном за счет ее вязкого растекания и лишь на последнем этапе вступает в действие механизм выпрессовывания диска.

Проведены также расчеты для начальных условий, когда механизм перфорации пластины качественно иной. В частности, в трехмерной постановке решалась задача соударения стального бойка ($d = 20$ мм, $h = 37,5$ мм) со стальной пластиной толщиной 10 мм при $\varphi = 15^\circ$ и $v_0/a_0 = 0,157$.

На рис. 3 представлены расчетные зависимости вертикальной и горизонтальной скоростей вдоль оси симметрии ударника и пластины. Профили, иллюстрирующие распределение вертикальной скорости, соответствуют моментам времени (в мкс): 1 — 2, 2 — 4, 3 — 12, 4 — 22. Этим же моментам времени соответствуют зависимости горизонтальной скорости (кривые 5 — 8). Положение осевой точки контактной поверхности отмечено крестиками. Из рисунка следует, что составляющие скорости осевых точек пластины к $t = 22$ мкс становятся практически равными соответствующим составляющим скорости осевой точки контактной поверхности ударника. Это свидетельствует о завершении к данному моменту времени процесса перфорации. Происходит выпрессовка из пластины части материала, площадь которого для указанного относительно небольшого угла взаимодействия близка к миделеву сечению ударника. Одним из критериев, характеризующих разрушение пластин в случае выпрессовки диска, является удельная энергия сдвиговых деформаций [8]. Предполагается, что по достижении ею в некотором сечении пластины критического для данного конкретного материала значения в нем образуется трещина сдвига, которая, распространяясь от лицевой поверхности, выходит на тыльную поверхность пластины.

На рис. 4, а—в приведены диаграммы распределения удельной энергии сдвиговых деформаций на лицевой, срединной и тыльной поверхностях пластины в момент $t = 22$ мкс. Максимальное и минимальное значения удельной энергии сдвиговых деформаций по замкнутой границе,

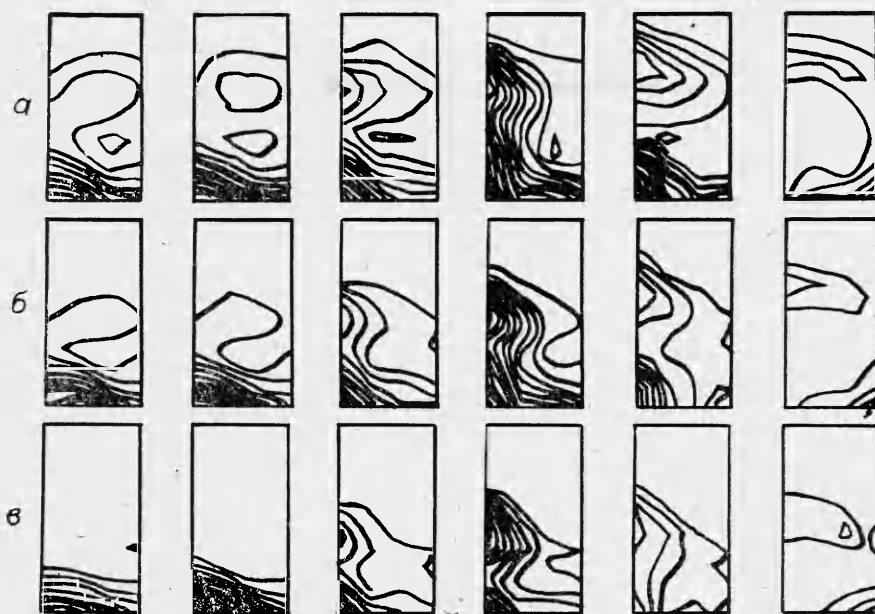


Рис. 6.

описывающей контуры выбиваемого диска, составляют на лицевой поверхности преграды 202 и 164 кДж/кг, на срединной поверхности 87 и 70 кДж/кг, а на тыльной — 53 и 32 кДж/кг. Эти значения хорошо коррелируют с критической удельной энергией сдвиговых деформаций для сходного по характеристикам материала, приведенной в [9]. С целью более подробного исследования особенности деформирования и разрушения цилиндрических ударников дополнительно рассмотрена задача взаимодействия стальных цилиндров с жесткой стенкой в широком диапазоне начальных условий.

На рис. 5 приведены конфигурации процесса деформирования цилиндрического ударника, соответствующие $t = 4, 6$ и 8 мкс ($d = 12,5$ мм, $h = 25$ мм, $\varphi = 30^\circ$, $v_0/a_0 = 0,294$, скорость звука в стали составляла 5100 м/с).

Динамику возникновения и развития повреждений в цилиндрическом ударнике характеризует рис. 6, *a—в*, где представлено распределение изолиний удельного объема трещин в вертикальных сечениях цилиндра в моменты $t = 6, 8$ и 10 мкс соответственно. Сечения расположены через каждые 30° , начиная от плоскости симметрии удара. Первое левое из приведенных сечений образует с плоскостью симметрии удара угол $\alpha = -30^\circ$. Ось симметрии цилиндра соответствует правой стороне каждого прямоугольника. Анализ полученных результатов свидетельствует, что в данном случае повреждения вблизи передней кромки цилиндра в основном обусловлены растягивающими напряжениями, вызванными растеканием материала цилиндра по препятствию. Удельный объем трещин в осевой точке контактной поверхности цилиндра к $t = 6$ мкс составляет $0,96 \cdot 10^{-5}$ м³/кг, а максимальные повреждения наблюдаются в вертикальных сечениях цилиндра при $\alpha = 120^\circ$. С течением времени область распространения трещин в данных сечениях растет и максимальное значение удельного объема трещин равняется $1,13 \cdot 10^{-5}$ и $1,6 \cdot 10^{-5}$ м³/кг при $t = 8$ и 10 мкс соответственно. Наблюдается характерная картина распределения повреждений в ударнике, свидетельствующая о том, что наиболее вероятным следует ожидать возникновение магистральных трещин в указанных сечениях цилиндра. Следует отметить, что в исследованном цилиндре относительно малого удлинения значительного уровня достигают разрушения вблизи тыльной поверхности.

Таким образом, проведенный трехмерный численный расчет несимметричного соударения цилиндрического бойка с пластиной позволил исследовать особенности перфорации пластин в широком диапазоне начальных условий. С ростом скорости встречи вязкое растекание материала пластины становится определяющим механизмом пробивания. Передняя часть цилиндра приобретает при внедрении существенно несимметричную форму. Показано наличие при внедрении ударника двух действующих механизмов разрушения — волнового и деформационного.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Бриджмен. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. М.: ИЛ, 1955.
2. Г. И. Канель, А. И. Дремин.— В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М., 1979.
3. В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974.
4. С. А. Новиков. ФГВ, 1985, 21, 6, 77.
5. Г. И. Канель, В. В. Шербань. ФГВ, 1980, 16, 4, 93.
6. В. А. Горельский, И. Е. Хорев, И. Т. Югов. ПМТФ, 1985, 4, 112.
7. И. Е. Хорев, В. А. Горельский.— В кн.: Детонация. Черногловка, 1981.
8. R. T. Sedgwick, L. J. Hagaman, L. J. Herrman e. a. Int. J. Eng. Sci., 1978, 16, 11, 859.
9. Г. П. Меньшиков, В. А. Одинцов, Л. А. Чудов. Изв. АН СССР. МТТ, 1976, 1, 125.

Поступила в редакцию 27/III 1986

УДК 662—215.1

О ПРОЯВЛЕНИИ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ВЕЩЕСТВА ДОБАВКИ В ИЗМЕРЕНИЯХ ВОЛНОВЫХ И МАССОВЫХ СКОРОСТЕЙ ДЕТОНАЦИИ ВВ

С. В. Першин, А. Н. Дремин, С. В. Пятернев, Д. Н. Цаплин

(Черногловка)

Настоящая работа продолжает исследования [1, 2], в которых показано, что увеличение скорости детонации D на ее зависимости от начальной плотности $\rho_{см}$ смеси ВВ с добавками графита и графитоподобного нитрида бора обусловлено протеканием полиморфных превращений этих веществ в зоне химической реакции [1], в конце которой на зарегистрированном магнитоэлектрическим методом профиле детонационной волны (ДВ) наблюдается резкий спад массовой скорости [2].

Цель настоящей работы — подтвердить справедливость данной трактовки. Для этого в круг исследований наряду с углеродом и нитридом бора включены добавки кремния и кварца — веществ, также претерпевающих полиморфные превращения в ударных волнах.

Изучались зависимости скорости детонации от начальной плотности смесей ВВ с добавками алмаза, графитоподобного нитрида бора, кремния и кварца, а также профили массовой скорости в смеси ТГ с кремнием. Постановка экспериментов описана в [1, 2]. Точность измерения $\rho_{см}$ и D в них не хуже 0,5%. Полученные результаты представлены на рис. 1—3.

Зависимости $D(\rho_{см})$ для смесей гексогена с 25% (по массе) алмаза и графита, несмотря на значительно меньший (<3 против 80 мкм) по сравнению с графитом размер частиц алмаза и на его уникальную (в 5 раз большую, чем у меди) теплопроводность, расположены в непосредственной близости друг от друга (см. рис. 1). Тот факт, что кривая для алмаза находится выше, свидетельствует о том, что переход графита в алмаз в зоне химической реакции должен сопровождаться ростом D , что и наблюдается на опыте [1]. Ситуация в данном случае такая же, как и с нитридом бора — линия $D(\rho_{см})$ для кубического нитрида бора лежит