

05.1

Ударно-откольная асимметрия в проблеме высокоскоростного соударения твердых тел

© И.Е. Хорев

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: khorev@main.tusur.ru

Поступило в Редакцию 28 сентября 2004 г.

Обнаружено и описано неизвестное ранее новое физическое явление при экспериментальном изучении проблемы высокоскоростного соударения различных бойков с металлическими преградами конечной толщины. Установлено, что в достаточно прочных и вязких конструкционных материалах (броневые стали, титановые сплавы и т.д.) наблюдается дробление формирующейся откольной тарелочки при динамическом контакте с ударником или с его сдеформированной частью на фрагменты. При этом образуется только нечетное число фрагментов, одинаковых по конфигурации (три, пять, семь и т.д.). В систематических опытах на сохраненных образцах прослежено дробление откольной тарелочки до одиннадцати фрагментов. Далее процесс улавливания фрагментов осложняется их высокой скоростью, что вызывает дополнительное (и неизбежное) дальнейшее дробление фрагментов откольной тарелочки при взаимодействии их с градиентным пакетом материалов уловителя (набор преград от кошмы до песка).

В систематических опытах на сохраненных образцах при достаточно широкой вариации размеров ударников (от 1 g до 1 kg) и их форм (от компактного до удлиненного) выявлено неизвестное ранее новое физическое явление при изучении проблемы высокоскоростного соударения различных бойков с преградами конечной толщины. Оно названо автором ударно-откольной асимметрией. В работе [1] установлено, что в случае высокоскоростного соударения различных бойков (компактных, удлиненных, пуль и снарядов) с преградами конечной толщины время развития откольного повреждения может стать сравнимым с временем проникания бойка или его деформированной части через преграду, в результате чего происходит контактное взаимодействие формирующейся откольной тарелочки с ударником.

При этом в пластичных материалах в откольной тарелочке образуется сквозное отверстие, равное диаметру бойка или его деформированной части, а в достаточно прочных конструкционных материалах откольная тарелочка дробится на фрагменты. Это установлено независимыми экспериментами по рентгенографированию процесса пробивания различными бойками преград и улавливанию откольных тарелочек в специальных устройствах.

Подобный механизм взаимодействия ударника с откольной тарелочкой подтвержден согласованными с экспериментами по начальным и граничным условиям параметрическими теоретическими исследованиями. Численное описание высокоскоростного взаимодействия различных бойков с преградами конечной толщины и их разрушение в осесимметричной постановке проводились методом конечных элементов [2]. В общем случае используемая модель взаимодействия тел конечных размеров описывается сжимаемой упругопластической средой, поведение которой при динамических нагрузках характеризуется модулем сдвига, динамическим пределом текучести и константами кинетической модели разрушения, описывающей развитие и эволюцию микрповреждений, которые непрерывно изменяют свойства материала и вызывают релаксацию напряжений [3].

Моделирование откольного разрушения конструкционных материалов осуществлялось, исходя из представления о непрерывной мере разрушения, в качестве которой выбран удельный объем трещин [4]. При этом скорость роста удельного объема трещин задавалась как функция действующего давления и достигнутого объема трещин, а по мере разрушения среды прочностные характеристики ее падают по определенным зависимостям [5]. Данным методом были проведены расчет и анализ удара о плоские преграды конечной толщины трех характерных типов бойков: пластинчатого, компактного (шарика или цилиндра с высотой, равной диаметру) и удлиненного (остроголовой пули или стержня). Расчеты доказательно подтвердили, что при пробитии преград компактными (размеры которых равны по всем трем направлениям) и удлиненными бойками стержневого типа происходит непосредственное взаимодействие ударников с формирующейся откольной тарелочкой и ее пробитие.

Дальнейшие систематические исследования этого явления на сохраненных образцах и улавливание фрагментов откольной тарелочки в процессе экспериментов показали, что в достаточно прочных и вяз-

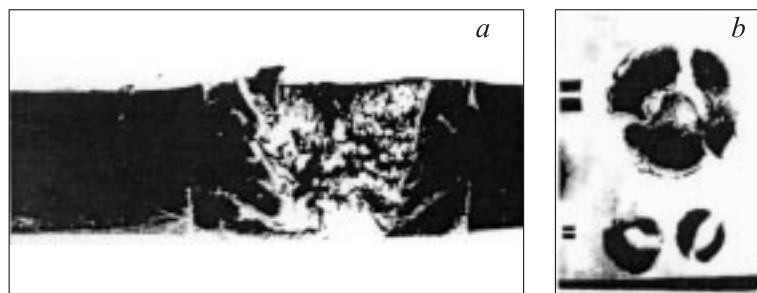


Рис. 1. Фотографии сохраненных образцов. Слева разрез преграды по плоскости симметрии. Сплава модели компактных ударников и уловленные фрагменты разрушенного откола (вверху) и целые откольные тарелочки (внизу).

ких конструкционных материалах (броневые стали, титановые сплавы и т.д.) наблюдается дробление откольной тарелочки при контакте с ударником или с его деформированной частью на фрагменты. При этом в процессе разрушения откольной тарелочки образуется только нечетное число фрагментов, одинаковых по конфигурациям (три, пять, семь и т.д.).

На рис. 1 показаны: фотографии разреза преграды из стали (НВ 300 kg/mm²) (рис. 1, *a*) и фотографии уловленных фрагментов откольных тарелочек (рис. 1, *b*) — вверху три фрагмента откольной тарелочки (скорость удара 3386 m/s), а внизу целые откольные тарелочки, не контактирующие с ударником (скорости порядка 3010 m/s). Слева на рис. 1, *b* приведены образцы ударников различного веса, используемых в этой серии опытов (компактные цилиндры с высотой, равной диаметру основания).

На рис. 2 приведены снимки откольных фрагментов, уловленных в опытах. Преграды были из конструкционной стали (НВ 300 kg/mm²) толщиной 22 mm. Слева три фрагмента (рис. 2, *a*), соответствующих скорости удара 1988 m/s стержневым ударником диаметром $d = 11.4$ mm и удлинением (отношением длины цилиндрического ударника 1 к его диаметру d) $\lambda = 1/d = 4$; а справа пять фрагментов откольной тарелочки (рис. 2, *b*), соответствующих скорости удара 1688 m/s стержневым ударником диаметром $d = 6.7$ mm и удлинением $\lambda = 1/d = 12$. В систематических опытах прослежено дробление



Рис. 2. Фотографии уловленных фрагментов откольных тарелочек при нагружении преград ударом удлиненных бойков различной геометрии.

откольной тарелочки до одиннадцати фрагментов. Далее процесс улавливания фрагментов осложняется их высокой скоростью (необходимо или увеличивать скорость удара или уменьшать толщину преграды). При этом происходит дополнительное (и неизбежное) дальнейшее дробление фрагментов откольной тарелочки при взаимодействии их с градиентным пакетом материалов уловителя (набор преград от кошмы до песка).

Таким образом, обнаружено неизвестное новое и не описанное ранее физическое явление при динамическом нагружении металлов и сплавов ударниками различной формы, состоящее в том, что в процессе пробивания преград конечной толщины при взаимодействии высокоскоростного ударника (компактного и удлиненного) с формирующейся в преграде откольной тарелочкой в достаточно прочных и вязких конструкционных материалах она разрушается только на нечетное число фрагментов. Это явление имеет чрезвычайно важное научное (фундаментальное) и практическое значение, связанное с созданием широкогодиапазонной теории динамического разрушения различных материалов, изучением физики и механики пробивания сложных конструкций, формированием осколочных потоков и т. д. [6,7]. Представляют научный и практический интерес теоретическое объяснение и обоснование этого явления и разработка его физико-математической модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 03–01–00386).

Список литературы

- [1] Хорев И.Е., Горельский В.А. // ДАН. 1982. Т. 256. С. 623–626.
- [2] Johnson G.R. // J. Appl. Mech. 1977. V. 44. N 3. P. 95–100.
- [3] Хорев И.Е., Горельский В.А. // Матер. 2-го Всес. совещ. по детонации. Черноголовка, 1981. В. 2. С. 149–152.
- [4] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов А.В. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1999. 408 с.
- [5] Канель Г.И., Щербань В.В. // ФГВ. 1980. № 4. С. 93–97.
- [6] Хорев И.Е., Зелепугин С.А., Коняев А.А. и др. // ДАН. 1999. Т. 369. № 4. С. 481–485.
- [7] Радченко А.В., Фортвов В.Е., Хорев И.Е. // ДАН. 2003. Т. 389. № 1. С. 49–54.