

11. Канель Г. И., Сугак С. Г., Фортгов В. Е. О моделях откольного разрушения // Проблемы прочности. 1983. № 8. С. 40—44.
12. Johnson G. R. High velocity impact calculations in three dimensions // Trans. ASME. Ser. E. Mech. 1977. V. 44. No. 1. P. 95—100.
13. Averbich J., Bodner S. R. Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates // Intern. J. Solids Struct. 1974. V. 10. No. 6. P. 671—684.
14. Горельский В. А., Хорев И. Е., Югов Н. Т. Динамика трехмерного процесса несимметричного взаимодействия деформируемых тел с жесткой стенкой // ПМТФ. 1985. № 4. С. 112—118.
15. Johnson G. R. Liquid—solid impact calculations with triangular elements // Trans. ASME. Ser. 1. J. Fluid. Engng. 1977. V. 99. No. 3. P. 598—600.
16. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластичных течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 212—263.
17. Wilkins M. L. Modelling the behavior of material // Structure Impact. and Crashworthiness: Proc. Intern. Conf., London, 1984. L.; N. Y., 1984. V. 2. P. 243—277.

Томск

Поступила в редакцию
25.VI.1986

УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ТЕЛ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАДАЧАХ СОУДАРЕНИЯ

БЕЛОВ Н. Н., КОРНЕЕВ А. И., ШУТАЛЕВ В. Б.

Развитие разрушений в телах ограниченных размеров при приложении интенсивных динамических нагрузок обусловлено процессами распространения и взаимодействия волн напряжений.

Один из возможных подходов к анализу развивающегося во времени разрушения тела основан на формулировке макрокритериев, обзор и анализ которых выполнен в [1]. При этом не учитывается влияние динамики разрушения на напряженно-деформированное состояние материала и снижение его прочности при последующем деформировании.

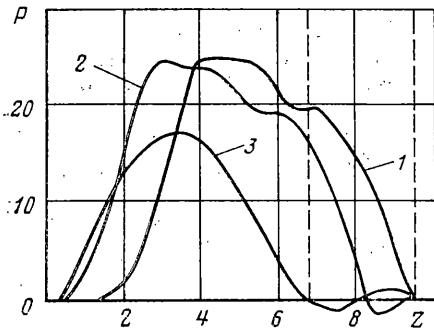
Учет этого факта возможен при введении в математическую модель среды дополнительного параметра, описывающего рост несплошностей в деформируемом материале и определяемого из дополнительного кинетического уравнения, замыкающего модель изотропной деформируемой среды [1—8]. Дополнительным параметром может служить величина, характеризующая пористость материала [5, 6, 8]. Рост пористости под действием приложенных нагрузок ослабляет материал, который при последующем нагружении выдерживает меньшие предельные нагрузки.

Такая модель [8] может быть сформулирована с позиций механики многофазных смесей [9]. В данной работе проанализирована в рамках модели [8] динамика разрушения соударяющихся тел квадратного поперечного сечения при различном отношении высоты тел к стороне основания. Показано, что различие в геометрических размерах приводит к качественно различной картине разрушения. Для системы уравнений [8], описывающей деформирование пористого упругопластического тела и полученной в предположении, что в начальный момент времени тело однородно и изотропно, а образующиеся несплошности имеют сферическую форму, и материал сохраняет изотропию, ставится краевая задача с начальными и граничными условиями. Начальные условия отвечают соударению тел в естественном, ненапряженном состоянии с заданной начальной пористостью, которая, в частности, может быть обусловлена технологией изготовления материала. Соответствующие граничные условия на контактных и свободных поверхностях, численный метод решения трехмерной краевой задачи динамики удара приведены в [10]. Физико-механические характеристики материала указаны в [8].

1. Рассмотрим соударение двух квадратных пластин с длиной стороны равной a и соотношением высоты пластины — ударника к высоте пластины — мишени $h_2 = 2,17 h_1$. Начальная скорость удара $v_0 = 0,14 c_0$ (c_0 — продольная скорость волны). Соотношение толщин ударника и мишени выбрано так, чтобы волны разгрузки, идущие от тыльных поверхностей ударника и мишени, встретились примерно на расстоянии, равном половине толщины мишени. Ширина пластины $a = 6,87 h_1$ и такова, чтобы при образовании откола в центральной области мишени боковые волны разгрузки не оказывают влияния на одномерность течения при образовании откола в некоторой зоне около центральной оси симметрии z декартовой системы координат с началом на тыльной стороне мишени.

Отнесем время процесса ко времени пробега упругой волной со скоростью c_0 расстояния h_2 , и обозначим безмерное время — t . На фиг. 1 представлены в различные моменты времени ($1 - t = 0,44$; $2 - t = 0,6$; $3 - t = 1,1$) зависимости первого инварианта тензора напряжений $\sigma = -p$ от координаты z , по которым можно судить о волновой картине процесса.

После соударения в ударнике и мишени образуются плоские ударные волны. Одновременно от свободных граней соударяющихся пластин вглубь сжатого материала распространяются волны разгрузки. При взаимодействии боковых волн разгрузки в углах пластин у поверхности контакта образуются зоны материала, в которых действуют растягивающие напряжения, приводящие к росту пористости. При $t=0,44$ величина пористости достигает предельного значения [8], то есть в этих областях происходит разрушение материала. К этому моменту ударный фронт в ударнике, достигнув его тыльной поверхности, отражается в сжатый материал в виде волн разгрузки. Материал разгружается сначала в упругой волне, а затем до нулевого давления в пластической волне разгрузки. Ударный фронт в мишени остается плоским на площадке со стороны $b=1,54 h_2$ для $t=0,44$ и $b=1,23 h_2$ для $t=0,6$. Он имеет двуволновую структуру. Впереди пластической волны сжатия распространяется упругий предвестник.

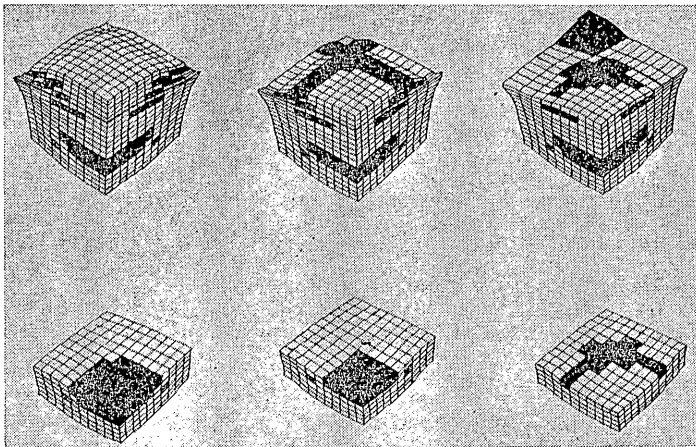


Фиг. 1

Последующие моменты времени процесса характеризуются интерференцией волн напряжений, распространяющихся от свободных тыльных поверхностей и боковых граней соударяющихся тел.

На фиг. 2 в изометрической проекции представлена картина разрушения для одной четверти соударяющихся пластин в момент времени $t=2,31$. Ячейки расчетной сетки, в которых пористость достигла предельной величины, отмечены черным цветом. С целью иллюстрации трехмерной картины разрушения сверху слева направо срезаны последовательно ряды ячеек: два слоя ячеек; удалены ячейки ударника, далее срезано восемь, девять, одиннадцать слоев ячеек, начиная от контактной поверхности. В мишени образовалась откольная трещина. Она расположена от тыльной поверхности на расстоянии, равном, примерно, толщине ударника. Размер трещины составляет около половины ширины соударяющихся пластин. Местоположение этой трещины находится в соответствии с простейшим анализом взаимодействия волн, проведенным в рамках одномерной теории распространения плоских волн. Ниже откольной трещины формируется зона разрушения в виде кольца, соединение которого со свободной поверхностью и откольной трещиной образует откольную тарелку. Области разрушения в пластине — ударнике возникают за счет взаимодействия боковых волн разгрузки. В углах пластины появляются трещины, которые «подрезают» их. Неразрушенной остается лишь центральная часть ударника.

2. Качественно вид картины разрушения в зоне около контактной поверхности не изменится при увеличении высоты соударяющихся тел квадратного сечения, например, при соосном соударении одинаковых стержней. Процесс соударения одинаковых стержней эквивалентен процессу удара стержня по жесткой преграде со скоростью в два раза меньшей. Фиг. 3 иллюстрирует картины разрушения, наблюдаемые в экспериментах при ударе со скоростями $v_0=(0,07-0,13) c_0$ по абсолютно жесткой преграде стержней квадратного сечения со стороной a и высотой $h=4a$. Отметим, что зона интенсивных пластических деформаций расположена у ударяющего конца стержня, и в ней развиваются разрушения. Взаимодействие волн разгрузки приводит, как и в случае соударяющихся пластин, к образованию трещин, подрезающих углы стержня (фиг. 4, эксперимент № 8 фиг. 3).



Фиг. 2

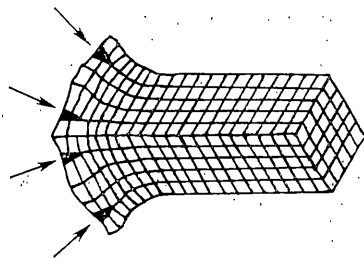


Фиг. 3

В численном расчете для начальной скорости удара $v_0=0,07 c_0$ в результате интенсивного радиального течения материала контактная поверхность в плане стремится к кругу (Фиг. 4). В центре стержня к моменту времени $t=0,43$ (время отнесено ко времени пробега упругой волны высоты стержня) образуется зона растягивающих напряжений. Материал в центре «разрыхляется» и разрушается, что способствует более интенсивному радиальному течению. Интенсивный рост пористости в зонах около углов стержня начинается к моменту времени $t=1,3$.

При увеличении скорости удара до $v_0=0,14 c_0$ в момент времени $t=0,3$ образуются трещины, подрезающие углы стержня, а разрушение в центральной части начинается позже, чем при ударе с $v_0=0,07 c_0$, и развивается на большую глубину. В дальнейшей зоне, в которой пористость возрастает, распространяется на большую глубину в центральной части стержня и растет от центра к углам, что приводит к разделению ударяющего конца стержня на четыре части.

В заключении отметим, что определение величины динамического предела текучести [11], основанное на сравнении рассчитанной и полученной экспериментально остаточной длины стержня после соударения, возможно лишь для таких скоростей удара, для которых в стержне не возникает разрушений.



Фиг. 4

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979. 271 с.
2. Аптуков В. Н., Николаев П. К., Поздеев А. А. Модель откольного разрушения с учетом температурных эффектов // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 4. С. 862-865.
3. Seaman L., Curran D. R., Shockey D. A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. № 11. P. 4814-4826.
4. Романьчева Л. К., Рузанов А. И. Численное исследование откольных разрушений в меди // ПМТФ. 1982. № 4. С. 117-122.
5. Нигматуллин Р. И., Ахмадеев Н. Х., Ахметова Н. А. Разрушение пластины из армо-железа в волнах разгрузки // Детонация: Материалы 2-го Всесоюз. совещания по детонации. Черногородка; ИХФ АН СССР, 1981. Вып. 2. С. 145-149.
6. Глушко А. И. Исследование откола как процесса образования микропор // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. № 5. С. 132-140.
7. Кондауров В. И., Петров И. Б. Расчет процессов динамического деформирования упругопластических тел с учетом континуального разрушения // Докл. АН СССР. 1985. Т. 285. № 6. С. 1344-1347.
8. Белов Н. Н., Корнеев А. И., Николаев А. П. Численный анализ разрушения в плитках при действии импульсных нагрузок // ПМТФ. 1985. № 3. С. 132-136.
9. Нигматуллин Р. И. Методы механики сплошной среды для описания многофазных смесей // ПИММ. 1970. Т. 34. Вып. 6. С. 1097-1112.
10. Корнеев А. И., Шугалев В. Б. Численный расчет трехмерного напряженного состояния стержня при ударе частью боковой поверхности // Изв. АН СССР. МТТ. 1986. № 1. С. 189-192.
11. Уилкинс М. Л., Гуинан М. У. Удар цилиндра по жесткой преграде // Механика: Период. сб. перев. иностр. статей. 1973. № 3. С. 112-128.