

УДК 539.375

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖЕСТКОЙ СТЕНКОЙ

ГОРЕЛЬСКИЙ В. А., ХОРЕВ И. Е., ЮГОВ Н. Т.

Процесс разрушения твердых деформируемых тел при динамическом нагружении является сложной проблемой [1]. Существенный прогресс в ее решении связан с применением моделей разрушения [2-4], в рамках которых до сих пор рассматривались двумерные (плоские и осесимметричные) задачи [5-9]. В данной работе исследуется трехмерная задача о деформировании и разрушении цилиндров, взаимодействующих с препятствием. Обсуждаются особенности возникновения и развития повреждений на различных стадиях процесса.

1. Система уравнений, описывающая нестационарные пространственные адиабатные движения твердой сжимаемой среды с учетом развития и накопления микроповреждений, имеет следующий вид:

$$\rho dv_i/dt = \sigma_{ij,j} + F_i \quad (1.1)$$

$$\partial \rho / \partial t + \operatorname{div}(\rho v) = 0 \quad (1.2)$$

$$\rho dE/dt = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (1.3)$$

$$\frac{dV_T}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |p| \leq p_c V_1 / (V_T + V_1) \vee (p > p_c V_1 / (V_T + V_1) \wedge V_T = 0 \\ -K_4 \operatorname{sign}(p) \left( |p| - p_c \frac{V_1}{V_T + V_1} \right) (V_2 + V_T), & \text{если} \\ p < -p_c V_1 / (V_T + V_1) \vee (p > p_c V_1 / (V_T + V_1) \wedge V_T > 0) \end{cases} \quad (1.4)$$

Здесь (1.1) — (1.4) — соответственно уравнения, движения, неразрывности, энергии, изменения удельного объема трещин. Компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций обозначены  $\sigma_{ij}$  и  $\varepsilon_{ij}$ , вектора скорости —  $v_i$ , плотность —  $\rho$ , удельная внутренняя энергия —  $E$ , удельный объем трещин —  $V_T$ , а  $V_1, V_2, V_3, V_4, p_c, K_4, \sigma_0$  — константы материала. Константы кинетической модели разрушения  $p_c, V_1, V_2, V_4$  для различных материалов определялись с помощью сопоставления результатов численных расчетов и экспериментальных данных, полученных в широком диапазоне условий нагружения [10-12].

Компоненты тензора напряжений имеют вид

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + S_{ij} \quad (1.5)$$

Шаровая часть тензора напряжений является функцией удельного объема, внутренней энергии и достигнутого удельного объема трещин

$$p = \sum_{n=1}^3 K_n \left( \frac{V_0}{V - V_T} - 1 \right)^n \left[ 1 - K_0 \left( \frac{V_0}{V - V_T} - 1 \right) / 2 \right] + K_0 \rho_0 E \quad (1.6)$$

где  $K_0, K_n, \rho_0$  — константы материала,  $V_0, V$  — начальный и текущий удельный объем элемента.

Компоненты деватора тензора напряжений определяются из соот-

$$2G(\varepsilon_{ij}^{-1}/3\varepsilon_{kk}\delta_{ij})=dS_{ij}^0/dt+\lambda S_{ij} \quad (1.7)$$

$$G=G_0V_3/(V_T+V_3), \quad \varepsilon_{ij}=1/2(\partial v_i/\partial x_j+\partial v_j/\partial x_i)$$

Здесь  $\varepsilon_{ij}$  — тензор скоростей деформаций,  $G$  — модуль сдвига, который зависит от достигнутого уровня повреждений; производная по Яуману определяется формулой

$$dS_{ij}^0/dt=dS_{ij}/dt-S_{ik}W_{jk}-S_{jk}W_{ik}, \quad 2W_{ij}=\partial v_i/\partial x_j-\partial v_j/\partial x_i \quad (1.8)$$

Параметр  $\lambda=0$  при упругой деформации, а при наличии пластической деформации определяется с помощью условия текучести Мизеса.

$$S_{ij}S_{ij}=2/3\sigma^2 \quad (1.9)$$

Здесь  $\sigma$  — динамический предел текучести, который зависит от достигнутого объема трещин следующим образом:  $\sigma=\sigma_0(1-V_T/V_4)$ , если  $V_T<V_4$ ;  $\sigma=0$ , если  $V_T\geq V_4$ .

2. Рассматривается задача соударения деформируемого тела вращения с жесткой стенкой. Вектор скорости ударника в начальный момент взаимодействия совпадает с его осью симметрии и образует с нормалью к преграде угол  $\alpha$ . Ударник занимает область  $D$  и ограничен поверхностями  $R_1$  и  $R_2$ , где  $R_1$  — контактная поверхность ударника с жесткой стенкой,  $R_2$  — свободная поверхность ударника. Для уравнений (1.1)–(1.9) ставится краевая задача с начальными при  $t=0$  и граничными на поверхностях  $R_1$  и  $R_2$  условиями.

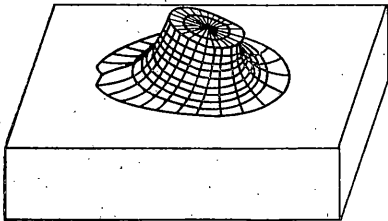
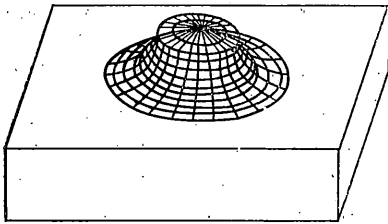
Начальные условия ( $x\in D$ ):  $\sigma_{ij}(0, x)=E(0, x)=V_T(0, x)=0$ ,  $\rho(0, x)=\rho_0$ ,  $V_1(0, x)=-v_0 \sin \alpha$ ,  $v_2(0, x)=0$ ,  $v_3(0, x)=-v_0 \cos \alpha$ .

Граничные условия:  $\sigma_{N_N}(t, x)=\sigma_{N_{\tau_1}}(t, x)=\sigma_{N_{\tau_2}}(t, x)=0$ ,  $x\in R_2$ ,  $\sigma_{N_{\tau_1}}(t, x)=\sigma_{N_{\tau_2}}(t, x)=0$ ,  $v_N(t, x)=0$ ,  $x\in R_1$ .

Здесь  $N$  — единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  — взаимно перпендикулярные единичные вектора в плоскости, касательной к поверхности в рассматриваемой точке,  $\sigma_N$  — вектор силы на площадке с нормалью  $N$ .

Используемые для решения задачи соотношения численного метода конечных элементов изложены в [5, 9].

3. В работе в рамках модели адиабатной сжимаемой упругопластической среды, повреждаемость которой описывалась кинетической моделью разрушения, в трехмерной постановке исследуется процесс образования и развития повреждений в цилиндрическом образце при несимметричном взаимодействии его с жесткой стенкой. Динамика образования и распределения повреждений в исследуемом образце характеризовалась в численном эксперименте удельным объемом трещин. Построены изолинии удельной энергии сдвиговых деформаций, которые определяют локализацию сдвиговых разрушений в случае, если превышено критическое значение энергии сдвиговых деформаций материала.

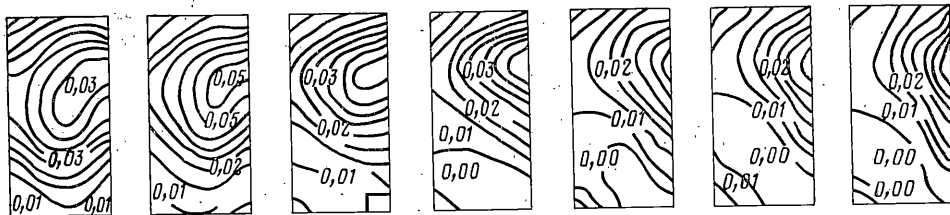


Фиг. 1

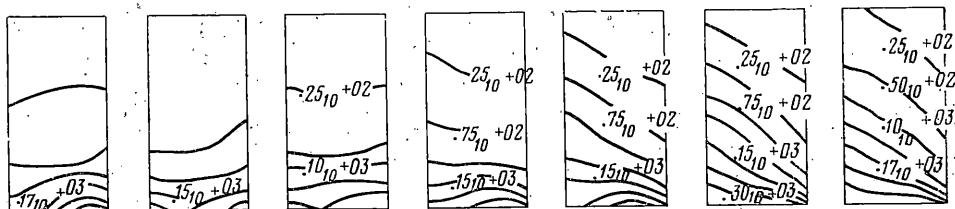
В расчетах моделировалось поведение стального цилиндра размером  $0,008 \text{ м} \times 0,008 \text{ м}$ . Скорость соударения составляла  $10^3 \text{ м/с}$ . Угол встречи цилиндра с препятствием варьировался и принимал значения 5, 15, 30 и  $45^\circ$ .

На фиг. 1 приведены полученные с графопостроителя конфигурации ударников при углах встречи 5 и  $15^\circ$  в момент времени 4 мкс. Видно, что в процессе взаимодействия ударники приобретают существенно несимметричную форму, причем во втором случае на передней кромке образца отчетливо наблюдается формирование характерной выемки. Для выявления механизмов разрушения цилиндров на последующих трех фигурах представлены распределения изолиний удельного

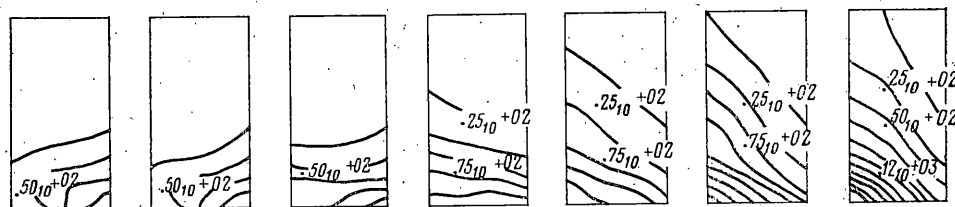
объема трещин и энергии сдвиговых деформаций в вертикальных сечениях цилиндра, отсчитываемых по часовой стрелке от плоскости симметрии удара, последовательно через каждые  $30^\circ$ . Ось симметрии цилиндра расположена для всех сечений справа.



Фиг. 2



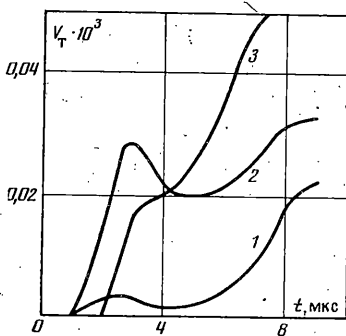
Фиг. 3



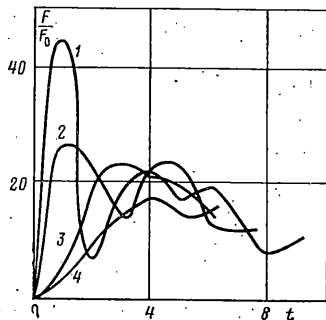
Фиг. 4

На фиг. 2 приведены изолинии удельного объема трещин для угла встречи  $5^\circ$  в момент времени 3 мкс. Анализ полученных результатов показывает, что первоначально очаги микрповреждений образуются в нижней левой части образца в сечениях между углами  $0$  и  $30^\circ$ . Они обусловлены взаимодействием волн разгрузки, возникающих на свободной боковой поверхности цилиндра. Наибольшие значения уровня повреждений расположены в сечении с углом в  $0^\circ$  и уменьшаются по мере увеличения угла. К моменту времени 3 мкс возникает вторая зона повреждений вблизи тыльной и левой боковой поверхности, обусловленная взаимодействием волн разгрузки, распространяющихся от боковой и тыльной поверхности цилиндра. Наибольшие значения уровня повреждений расположены также в сечении, отвечающем углу  $0^\circ$ . С увеличением угла уровни повреждений в сечениях уменьшаются и минимальны при угле в  $180^\circ$ . Возникновение повреждений и рост зон, охватываемых повреждениями, обусловлены волновым характером процесса взаимодействия. В дальнейшем, примерно до 5 мкс, наблюдается частичное закрытие микрповреждений и некоторое уменьшение размеров их очагов в результате поджатия материала цилиндра. Волны напряжений уже не имеют прежней интенсивности и на сложившуюся картину повреждений в образце не оказывают заметного влияния. Однако с момента времени 6 мкс зоны повреждений вновь начинают увеличиваться, одновременно смещаясь влево вследствие пластического растекания материала цилиндра, и к 7 мкс выходят на его боковую поверхность в месте пересечения ее с плоскостью симметрии. В результате образуется магистральная область повреждений, начинающаяся на верхней боковой поверхности передней части ударника и проходящая через весь образец на его тыл.

Для угла взаимодействия цилиндра с препятствием  $15^\circ$  имеются отличия в характере образования повреждений от рассмотренного случая. Так, например, из-за увеличения угла встречи вертикальная составляющая скорости цилиндра уменьшается, что в свою очередь приводит к формированию более слабой волны сжатия. При ее отражении от поверхности цилиндра возникают волны разрежения слабой интенсивности, взаимодействие которых не приводит к возникновению повреждений, достаточных для разрушения образца. К моменту времени 2 мкс, когда в образце происходят процессы, обусловленные волновыми эффектами, объемы микрповреждений не достигают значения  $1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ , которое является достаточно малым при оценке степени повреждения образца. По мере деформации цилиндра возникают повреждения, связанные с пластическим растеканием материала, и удельный объем трещин достигает своего наибольшего значения  $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$  в передней области цилиндра вблизи плоскости симметрии.



Фиг. 5



Фиг. 6

Для угла  $30^\circ$  повреждения, обусловленные взаимодействием волн разгрузки в начальной стадии процесса, незначительны и не приводят к существенным разрушениям в образце. В дальнейшем вследствие пластического растекания материала цилиндра по препятствию образуются дополнительные зоны разрушения, в которых удельный объем трещин равен  $4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/кг, но расположены они, в отличие от рассмотренных ранее углов взаимодействия, в сечениях между углами в  $45^\circ$  и  $120^\circ$ . Аналогичная картина распределения повреждений в образце имеет место и для угла встречи  $45^\circ$ . Однако, хотя характер распределения повреждений качественно совпадает для обоих углов, количественные различия имеются. В частности, максимальные значения удельного объема трещин к моменту времени 6 мкс для угла  $45^\circ$  равны  $2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>/кг и разрушения охватывают меньшие области, чем это наблюдается для угла встречи  $30^\circ$ .

Важной характеристикой, на основании которой можно делать оценки по разрушению образца, является удельная энергия сдвиговых деформаций.

Изолинии распределения удельной энергии сдвиговых деформаций в последовательных сечениях цилиндра для углов взаимодействия  $30^\circ$  и  $45^\circ$  в момент времени 6 мкс приведены на фиг. 3, 4 соответственно. Видно, что в отличие от повреждений, описываемых кинетической моделью разрушения и располагающихся в основном с левой стороны от оси цилиндра, изолинии энергии сдвиговых деформаций концентрируются в правой нижней части образца вокруг начальной точки контакта. В процессе дальнейшей деформации цилиндра изолинии удельной энергии сдвиговых деформаций фиксированных уровней смещаются вверх, охватывая при этом все большие области. Сопоставляя картину распределения изолиний по сечениям для углов  $30^\circ$  и  $45^\circ$ , можно отметить следующие различия. В момент времени 6 мкс для угла встречи  $30^\circ$  во всех сечениях цилиндра проходит изолиния удельной энергии сдвиговых деформаций, соответствующая значению 175 кДж/кг. Для угла встречи  $45^\circ$  данное значение сдвиговой энергии наблюдается лишь в сечениях, угол которых с плоскостью симметрии процесса больше  $120^\circ$ . Вообще можно отметить, что при увеличении угла взаимодействия изолинии удельной энергии сдвиговых деформаций поднимаются вверх по боковой поверхности цилиндра со стороны начальной точки контакта. Это хорошо видно из фиг. 3 и 4.

Соответственно должна наблюдаться аналогичная тенденция при сдвиговом разрушении нижней части образца, которое происходит вдоль изолиний с критическим значением удельной энергии сдвиговых деформаций.

На фиг. 5 приведены графики изменения удельного объема трещин на оси цилиндра: 1 — на контактной поверхности, 2 — на средней, 3 — на тыльной поверхности. Возрастание кривой 1 до момента времени 2,5 мкс соответствует образованию повреждений при взаимодействии волн разгрузки после отражения волны сжатия от боковой поверхности цилиндра. Участок падения кривой соответствует подавлению образовавшихся повреждений в результате поджатия материала цилиндра. Последующее значительное возрастание связано с образованием повреждений, обусловленных пластическим растеканием материала цилиндра по препятствию. Вид кривой 2 аналогичен, но отличие состоит в том, что к моменту времени 3 мкс она имеет значительно более высокий уровень повреждений, обусловленный комбинацией совокупностью очагов, образовавшихся при взаимодействии волн разгрузки, распространяющихся от боковой и тыльной поверхностей цилиндра. Кривая 3 имеет вид, отличный от кривых, рассмотренных раньше. Резкий рост кривой, начиная с 2 мкс, соответствует выходу волны сжатия на тыльную поверхность. В дальнейшем возрастание кривой связано также с пластическим растеканием цилиндра.

На фиг. 6 приведены зависимости силы воздействия образца на жесткую стенку от времени для углов удара  $5^\circ$  — кривая 1,  $15^\circ$  — 2,  $30^\circ$  — 3,  $45^\circ$  — 4. Сопоставление фиг. 5 и 6 показывает, что падение силы воздействия для кривой 1 к моменту времени 2 мкс связано с образованием повреждений вблизи и на поверхности контактной поверхности, что приводит к релаксации напряжений в образце. Последующее возрастание кривой обусловлено поджатием материала в области контактной поверхности. В результате формируется повторный импульс сжатия, отражение которого от тыльной поверхности приводит к росту имеющихся повреждений и связанной с ними релаксацией напряжений. Следствием этого является вторичное падение силы воздействия цилиндра на препятствие.

Аналогичный характер имеют и последующие локальные всплески на кривой. С течением времени сильное падение силы сопротивления обуславливается кроме релаксации напряжений, связанной с ростом пор, также значительным уменьшением запаса кинетической энергии образца.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979. 271 с.
2. Златин Н. А., Пугачев Г. С., Мочалов С. М., Брагов А. М. Временная закономерность прочности металлов при долговечностях микросекундного диапазона.— ФТТ, 1975, т. 17, № 9, с. 2599—2602.
3. Curran D. R., Seaman L., Shockey D. A. Dynamic failure in solids.— Phys. Today, 1977, v. 30, № 4, p. 46—55.
4. Канель Г. И., Дремин А. Н. Экспериментальное исследование и численное моделирование эволюции импульса сжатия и откола в железе.— В кн.: Тез. докл. 3-го Всесоюз. симп. по импульсным давлениям. М.: Изд-е ВНИИ физ.-техн. и радиотехн. измерений, 1979, с. 60—61.
5. Хорев И. Е., Горельский В. А. Численное моделирование откольных разрушений при осесимметричном взаимодействии твердых тел.— В кн.: Детонация: Материалы 2-го Всесоюз. совещ. по детонации. Черноголовка, 1981, вып. 2, с. 149—153.
6. Глушко А. И. Численное решение задачи соударения цилиндрических пластин с учетом накопления микропор.— Изв. АН СССР. МТТ, 1981, № 4, с. 115—124.
7. Хорев И. Е., Горельский В. А. Осесимметричный откол в задачах широкодиапазонного взаимодействия твердых тел.— Докл. АН СССР (ДАН СССР), 1983, т. 271, № 3, с. 623—626.
8. Хорев И. Е., Горельский В. А., Зелузин С. А., Толкачев В. Ф. Исследование деформирования и кинетики разрушения контактирующих тел при несимметричном динамическом взаимодействии.— Физика горения и взрыва, 1983, т. 19, № 5, с. 119—123.
9. Johnson G. R. Analysis of elastic-plastic impact involving severe distortions.— Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech., 1976, v. 43, № 3, p. 439—444.
10. Глузман В. Д., Канель Г. И. Измерение растягивающих напряжений за плоскостью откола.— ПМТФ, 1983, № 4, с. 146—150.
11. Молодец А. М., Дремин А. Н. Рассеяние механической энергии и коэффициент затухания в откольно-поврежденном материале.— Физика горения и взрыва, 1984, т. 20, № 2, с. 79—86.
12. Канель Г. И., Сузак С. Г., Фортов В. Е. О моделях откольного разрушения.— Проблемы прочности, 1983, № 8, с. 40—44.

Томск

Поступила в редакцию  
6.XII.1984