

## Зависимость глубины проникания от параметров удлиненного ударника\*

С. В. Жураховский, К. Б. Иващенко, Ю. А. Рязанов

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Выполнено численное моделирование проникания удлиненных ударно-разрушаемых металлических ударников в ударно-разрушаемые толстые пластины. Исследовано влияние геометрической формы и материала ударника на глубину проникания и возможность сквозного пробивания мишени. Глубина проникания исследована для случая приближения скорости удара к гидродинамическому пределу.*

**Ключевые слова:** высокоскоростной удар, проникание, деформационное разрушение, кратер, гидродинамический предел.

В последнее время изучению высокоскоростного удара и проникания ударников в мишени уделяется достаточно много внимания [1–8]. Анализ результатов [9–11] исследования глубокого проникания удлиненных деформируемых ударников в разрушаемые металлические мишени при скоростях ниже гидродинамического предела свидетельствует о наличии специфических факторов, не характерных для более простых случаев соударения.

Наряду со значительным формоизменением обоих тел и проявлением сложных упругопластических свойств материалов особенность проникания удлиненных ударников состоит в том, что процесс взаимодействия на всем его протяжении сопровождается распределенным во времени разрушением индентора и материала в кратере в глубине мишени. Недостаточно изученным остается вопрос, насколько далеко от гидродинамического предела по скорости гидродинамическая модель соударения [12, 13] дает приемлемую точность в прогнозировании глубины проникания.

Ниже сформулирована математическая модель высокоскоростного проникания удлиненного разрушаемого металлического ударника в разрушаемую толстую стальную пластину. Включение в модель феноменологических допущений позволило в основном преодолеть указанные трудности и исследовать процесс соударения, сопровождаемый деформационным разрушением. Изучено влияние материала и геометрической формы ударника на глубину проникания в препятствие в диапазоне скоростей, близком к гидродинамическому пределу.

**Математическая модель** соударения деформируемых тел, сформулированная в осесимметричной лагранжевой постановке с учетом законов сохранения механики сплошной среды, включает:

уравнения движения

$$\rho_0 \dot{U}_i = \frac{\partial D_{ij}}{\partial j} + V Q_i, \quad i, j = \{z, r\}, \quad Q_z = \frac{\sigma_{zr}}{\tilde{r}}, \quad Q_r = \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{\tilde{r}}; \quad (1)$$

\* Доклад на IV Международном симпозиуме “Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций при импульсном нагружении” (IMPULSE-2001).

геометрические соотношения

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial j} + \frac{\partial U_j}{\partial i} \right), \quad e_{\varphi\varphi} = \frac{U_r}{r}, \quad e_{i\varphi} = 0, \quad i, j = \{z, r\}; \quad (2)$$

уравнения для компонент тензора скоростей деформаций

$$\frac{\partial U_i}{\partial j} = \frac{\partial U_i}{\partial \tilde{k}} \frac{\partial \tilde{k}}{\partial j} = \frac{\partial U_i}{\partial \tilde{k}} H_{kj}, \quad i, j, k = \{z, r\}, \quad V = \det(H^{-1}), \quad D = VH\sigma; \quad (3)$$

уравнения для девиаторных компонент тензора

$$s_{ij} = 2\mu \left( e_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{V}{V} \right), \quad i, j = \{z, r\}; \quad (4)$$

условие идеальной пластичности Мизеса

$$s_{zz}^2 + s_{rr}^2 + s_{\varphi\varphi}^2 + 2s_{zz}^2 \leq \frac{2}{3} \sigma_p^2; \quad (5)$$

уравнения для компонент тензора напряжений Коши

$$\sigma_{ij} = s_{ij} - \delta_{ij} P(V), \quad i, j = \{z, r\}, \quad P(V) = G(1 - 1/V), \quad (6)$$

где  $\rho_0$  – начальная плотность;  $D_{ij}$  – компоненты первого тензора Пиола–Кирхгофа;  $H_{ij}$  – компоненты актуальной матрицы перехода между эйлеровой и расчетной лагранжевой системой координат;  $V$  – актуальный относительный объем;  $U_i$  – компоненты вектора массовой скорости;  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений Коши;  $e_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $s_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\sigma_p$  – предел упругости;  $\mu$  – второй упругий модуль;  $G$  – коэффициент объемного сжатия.

На границе соударяемых тел реализуется условие проскальзывания. В расчетах принимается, что после разрушения происходит необратимое удаление материала из зоны деформирования, что соответствует его выносу на стенки кратера без дальнейшего вклада в торможение ударника. Численный алгоритм решения задачи соударения разработан на основе конечно-разностной лагранжевой формулировки. Подробно алгоритм описан в [14].

**Моделирование** соударения компактных бойков с мишенями, как правило, опирается на силовые модели локального динамического разрушения [15]. Для относительно более длительных процессов глубокого проникания удлиненных ударников разрушение распределено как во времени, так и в пространстве. Оно происходит на всем протяжении проникания и захватывает все новые участки взаимодействующих тел. Поэтому в данном случае более адекватным будет использование деформационных моделей локального динамического разрушения.

В модели локального деформационного разрушения используется параметр распределенной поврежденности материала, который увеличивается в процессе деформирования. Мера распределенной поврежденности принимается пропорциональной локальной работе пластических деформаций  $E^P$  [2, 16]:

$$dE^P = \sum_{i,j} \sigma^{ij} d\varepsilon_{ij}^P. \quad (7)$$

Вторым необходимым компонентом модели разрушения является критерий локального разрушения материала. Вместе с тем сложность адекватного решения этой задачи требует использования феноменологических подходов. В ходе пластического деформирования в материале происходит накопление внутренней энергии. Если ее величина достигнет удельной теплоты плавления, то материал полностью теряет прочность (плавится). Однако теоретически оценить, какая часть работы пластического деформирования переходит, собственно, во внутреннюю энергию, а какая на структурные и фазовые превращения, не приводящие непосредственно к разупрочнению материала, не представляется возможным.

Использование предлагаемого феноменологического подхода позволяет упростить указанную проблему за счет введения безразмерного коэффициента разупрочнения  $K$ , задающего кратность работы пластической деформации для наработки единицы внутренней энергии. Разрушение наступает по достижении внутренней энергией удельной теплоты плавления ( $C_m$ ):

$$E^P = KC_m, \quad K > 1. \quad (8)$$

Значение  $K$  должно подбираться путем сравнения глубины кратера в базовом эксперименте и серии численных расчетов. Хотя коэффициент  $K$  не является константой материала, все же расчеты показали, что при изменении скорости соударения и геометрических пропорций ударника вдвое, его значение могло считаться постоянным отдельно для ударника и мишени.

Расчеты проводили для мишени толщиной 700 мм из стали ( $\rho_m = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $G = 199$  ГПа,  $\mu = 77,5$  ГПа,  $\sigma_p = 0,25$  ГПа,  $C_m = 460$  Дж/(кг·К),  $K = 4,0$ ) и ударника из высокопрочной стали ( $\rho_{уд} = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $G = 192$  ГПа,  $\mu = 80,6$  ГПа,  $\sigma_p = 0,25$  ГПа,  $C_m = 460$  Дж/(кг·К),  $K = 2,8$ ) или вольфрама ( $\rho_{уд} = 19,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $G = 305$  ГПа,  $\mu = 161,5$  ГПа,  $\sigma_p = 2,09$  ГПа,  $C_m = 142$  Дж/(кг·К),  $K = 2,1$ ). Скорость удара  $v_0 = 1500$  и  $2500$  м/с при массе ударника  $m_{уд} = 7$  или  $14$  кг. При этом удлинение (отношение длины  $l$  к радиусу  $r$ ) равно 6 или 12.

В таблице для 16 вариантов удара приведены абсолютная величина глубины проникания  $L$  и ее отношение к длине ударника  $L/l$ . Для сравнения представлено также отношение  $L_h/l$ . Глубина проникания в гидродинамическом приближении  $L_h$  определяется из формулы

$$L_h = l(\rho_{\text{уд}}/\rho_{\text{м}})^{1/2}. \quad (9)$$

По степени близости показателя  $L/L_h$  к единице можно судить о приближении к гидродинамическому пределу.

Аналитические (гидродинамические) и расчетные значения глубины проникания ударника различной длины  $l$

№ варианта удара	Материал ударника	$m_{\text{уд}}$ , кг	$l/r$	$\rho_{\text{уд}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$l$ , мм	$r_{\text{уд}}$ , мм	$v_0$ , м/с	$L$ , мм	$L/l$	$L_h/l$	$L/L_h$
1	Сталь	7	6	7800	217	36	1500	122	0,56	1,00	0,56
2	Вольфрам	7	6	19200	161	27	1500	114	0,71	1,57	0,45
3	Сталь	7	6	7800	217	36	2500	179	0,82	1,00	0,82
4	Вольфрам	7	6	19200	161	27	2500	161	1,00	1,57	0,64
5	Сталь	7	12	7800	345	29	1500	190	0,55	1,00	0,55
6	Вольфрам	7	12	19200	256	21	1500	178	0,70	1,57	0,44
7	Сталь	7	12	7800	345	29	2500	271	0,79	1,00	0,79
8	Вольфрам	7	12	19200	256	21	2500	278	1,09	1,57	0,69
9	Сталь	14	6	7800	274	46	1500	156	0,57	1,00	0,57
10	Вольфрам	14	6	19200	203	34	1500	135	0,66	1,57	0,42
11	Сталь	14	6	7800	274	46	2500	239	0,87	1,00	0,87
12	Вольфрам	14	6	19200	203	34	2500	221	1,09	1,57	0,69
13	Сталь	14	12	7800	435	36	1500	219	0,50	1,00	0,50
14	Вольфрам	14	12	19200	322	27	1500	220	0,68	1,57	0,43
15	Сталь	14	12	7800	435	36	2500	353	0,81	1,00	0,81
16	Вольфрам	14	12	19200	322	27	2500	357	1,11	1,57	0,71

Применение в качестве материала ударника вольфрама вместо стали оказывает наибольшее по сравнению с другими рассмотренными факторами влияние на глубину проникания. Это согласуется с тем, что при переходе к гидродинамическому пределу факторами, влияющими на глубину канала пробоя, являются длина ударника и соотношение плотностей материалов ударника и мишени. Расчеты показывают, что качественный анализ на основе упрощенной модели дает правильный прогноз. В то же время количественные оценки по гидродинамической модели значительно отличаются от результатов численных расчетов. Среднее значение отношения  $L/L_h$  для стального ударника равно 0,55 и 0,82 при скоростях 1500 и 2500 м/с соответственно, для вольфрамового ударника – 0,44 и 0,68 соответственно.

Изменение удлинения ударника явилось вторым по значимости фактором, влияющим на глубину проникания. При анализе влияния этого фактора были построены корреляционные зависимости между глубиной проникания и длиной ударника. Для вариантов проникания стального ударника эта зави-

симось имела вид  $L = 0,603l + 24$  (мм) (расчетное гидродинамическое значение  $L_h = l$ ), для вольфрамового ударника –  $L = 0,936l + 12$  (мм) (расчетное гидродинамическое значение  $L_h = 1,57l$ ). Чем дальше от гидродинамического предела находится вариант соударения, тем больше отличие корреляционной зависимости от прогнозируемой.

Третий по значимости фактор – масса ударника. Увеличение массы ударника с 7 до 14 кг без роста удлинения последнего оказалось малоэффективным.

## Выводы

1. Для моделирования соударения с высокими скоростями предложена феноменологическая модель локального деформационного разрушения, включающая коэффициент разупрочнения.

2. Расчеты показали, что при скорости удара порядка половины скорости гидродинамического перехода гидродинамическая модель дает примерно двукратное превышение глубины проникания по сравнению с моделью, учитывающей неупругие свойства материала и деформационное разрушение. Однако подтверждаются качественные выводы гидродинамической модели о наибольшем влиянии соотношения плотностей материалов ударника и мишени, а также длины ударника на глубину проникания.

## Резюме

Виконано числове моделювання проникання подовжених ударно-руйнівних металічних ударників в ударно-руйнівні товсті пластини. Досліджено вплив геометричної форми і матеріалу ударника на глибину проникання та можливість наскрізного пробивання мішені. Глибина проникання досліджена для випадку наближення швидкості удару до гідродинамічної границі.

1. *Зукас Дж. А., Николас Т., Свифт Х. Ф. и др.* Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с.
2. *Майборода В. П., Кравчук А. С., Холин Н. Н.* Скоростное деформирование конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.
3. *Степанов Г. В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 288 с.
4. *Харченко В. В.* Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учетом вязкопластических эффектов. – Киев: Ин-т пробл. прочности НАН Украины, 1999. – 280 с.
5. *Hypervelocity Impact: Proc. of Symp. (San Antonio, Texas, Oct. 21–24, 1986) // Int. J. Impact Eng. – 1987. – 5, No. 1-4.*
6. *Антуков В. Н.* Проникание: механические аспекты и математическое моделирование // Пробл. прочности. – 1990. – № 2. – С. 60 – 68.

7. *Shataram D., Owen D. R. J., and Zienkiewicz O. C.* Dynamic transient behaviour of two-and three-dimensional structures including plasticity, large deformation effects and fluid interaction // *Int. J. Earthquake Eng. and Struct. Dyn.* – 1976. – 4, No. 6. – P. 561 – 578.
8. *Wingrove A. L.* The influence of projectile geometry on adiabatic shear and target failure // *Metal. Trans.* – 1973. – 4, No. 8. – P. 1829 – 1833.
9. *Жураховский С. В., Иващенко К. Б.* Моделирование взаимодействия удлиненных ударников с пластинами средней толщины при скоростях 0,5...1,8 км/с // *Пробл. прочности.* – 1993. – № 7. – С. 70 – 78.
10. *Hutchings I. M.* The behavior of metal under ballistic impact at sub-ordnance velocities // *Material Behaviour under High Stress and Ultrahigh Loading Rates.* – New York; London: Plenum Press, 1983. – P. 161 – 196.
11. *Pidsley P. H.* A numerical study of long rod impact into a large targets // *J. Mech. Phys. Sol.* – 1984. – 32, No. 4. – P. 315 – 333.
12. *Томашевич И. И.* Проникание в преграду высокоскоростного потока удлиненных элементов // *Физика горения и взрыва.* – 1987. – № 2. – С. 97 – 101.
13. *Холт А.* О простых моделях проникания стержней в металлические полупространства // *Там же.* – 1990. – № 2. – С. 106 – 136.
14. *Иващенко К. Б.* Алгоритм расчета контактных границ при взаимодействии деформируемых твердых тел // *Пробл. прочности.* – 1989. – № 12. – С. 79 – 82.
15. *Ахмадеев Н. Х.* Динамическое разрушение твердых тел в волнах напряжений. – Уфа: Изд. БФ АН СССР, 1988. – 168 с.
16. *Евстропьев-Кудреватый В. В., Зильбельбранд Е. Л., Златин Р. А. и др.* Моделирование стационарного процесса высокоскоростного взаимодействия деформируемых твердых тел // *Журн. техн. физики.* – 1990. – 60, № 3. – С. 102 – 106.

Поступила 19. 09. 2002