

# ТЕОРЕТИКО – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ КОМПАКТНЫХ И УДЛИНЕННЫХ УДАРНИКОВ С ПРЕГРАДАМИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ: РИКОШЕТ, ВНЕДРЕНИЕ, ПРОБИТИЕ

А.В. ГЕРАСИМОВ, А.А. КОНЯЕВ, С.В. ПАШКОВ

НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета,  
Россия, Томск, [ger@niipmm.tsu.ru](mailto:ger@niipmm.tsu.ru)

Создание надежных защитных устройств различных объектов требует знания особенностей процессов протекающих при ударном нагружении устройств различной конфигурации, конструктивных особенностей и использующих различные материалы. При этом не менее существенны скорость соударения и углы подхода ударников к преграде. В данной работе проводится теоретико-экспериментальное исследование высокоскоростного взаимодействия компактных и удлиненных ударников с преградами конечной толщины. Рассматриваются случаи рикошета, проникания и пробития преград при различных скоростях и углах соударения.

Формулировка условий рикошетирувания ударников от преграды при наклонном ударе представляет важную, но трудную для экспериментального решения проблему конечной баллистики.

При малых и умеренных углах подхода ( $\sim 45^\circ \dots 60^\circ$ ) ударника от нормали к поверхности преграды влияние наклонного соударения проявляется в увеличении “толщины” преграды в направлении вектора скорости. Однако, в зависимости от свойств материалов соударяющихся тел, геометрии ударника, скорости соударения и ориентации ударника в момент контакта с преградой, существует критический угол, при котором и выше которого ударник рикошетирует. При низких скоростях соударения ударник и преграда практически не деформируются – имеет место упругий рикошет. При повышении скорости удара рикошет сопровождается пластическими деформациями – наблюдается пластический рикошет [1]. Возможно также несквозное проникание под углом без рикошета и сквозное проникание без рикошета. Таким образом, при ударе под углом сквозное проникание без рикошета и упругий рикошет дают верхнюю и нижнюю границы области условий встречи ударника с преградой, где рикошет переходит в пробивание преграды.

Задачи решаются в 3-D постановке с учетом естественной гетерогенности структуры реальных материалов, влияющей на распределение физико-механических характеристик по объему элементов конструкций и являющейся одним из факторов, определяющих характер разрушения последних. Необходимость учета данного фактора в уравнениях механики деформируемого твердого тела диктует применение вероятностных законов распределения физико-механических характеристик по объему рассматриваемой конструкции.

Для описания процессов деформирования и разрушения твердых тел используется модель сжимаемого идеально упругопластического тела [2,3]. В качестве критерия разрушения - достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [2]. Влияние начальных неоднородностей структуры материала учитывается вероятностным распределением критерия разрушения по ячейкам расчетной области с помощью модифицированного генератора случайных чисел, выдающего случайную величину, подчиняющуюся выбранному закону распределения [5].

Для численных расчетов предлагается методика, базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [3] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [4] для расчета контактных взаимодействий.

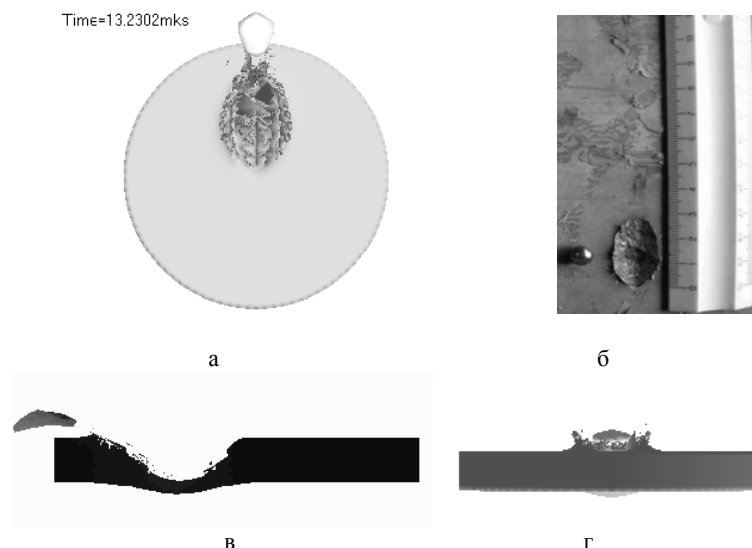


Рис. 1. Численное моделирование рикошетирувания стального шарика при взаимодействии с титановой преградой ( $t=13,23$  мкс;  $V = 3600$  м/с;  $\alpha = 75^\circ$ ): а - вид сверху; в, г – сечение вдоль и поперек каверны; б – эксперимент (фотография стального шарика в исходном состоянии и следа в титановой пластине, оставшегося после их взаимодействия).

На рисунке 1 приведены результаты численного моделирования рикошетирующего удара стального ударника-шарика диаметром 0,8 см при взаимодействии с титановой преградой толщиной 0,95 см и диаметром 8 см. Скорость ударника  $V = 3600$  м/с, угол соударения от нормали к преграде составлял  $\alpha = 75^\circ$ .

В численном исследовании получены следующие значения параметров кратера: большая ось кратера равнялась 30,5 мм, меньшая ось кратера-15 мм, глубина кратера – 8,2 мм. Экспериментальные данные характеризуются следующими значениями: большая ось кратера-28 мм, меньшая ось кратера-16 мм, глубина кратера – 7 мм.

В работе рассматривалось также соударение кластера из шести сферических элементов с преградой под различными углами к поверхности последней. Размеры пластин  $5 \times 5$  см, толщина – 0,35 см, материал- алюминий. Шарик – сталь, диаметр равняется 0,56 см. Центры группа шариков располагается по кругу с диаметром равным 1,5 см, соударение всех шариков с преградой происходит одновременно.

При увеличении угла соударения до  $80^\circ$  от нормали к поверхности пластины происходит рикошет ударников и деформированию преграды без существенных повреждений и пробития последней (рис.2).

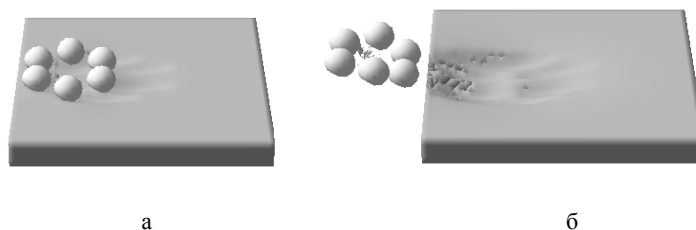


Рис.2. Групповой удар компактными элементами по тонкой преграде под углом  $80^\circ$  от нормали со скоростью 1500 м/с: а- $t=10$  мкс; б-  $t=25$  мкс.

На рисунке 3 приведены результаты расчетов удара стержня из сплава вольфрам - никель - железо диаметром 0,4 см и длиной 4 см с алюминиевой преградой толщиной 1,5 см и диаметром 3,2 см со скоростью  $V = 500$  м/с по нормали к преграде.

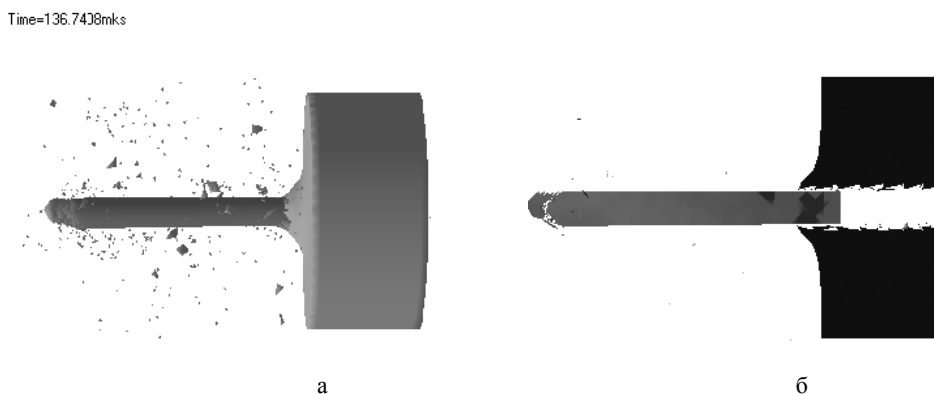


Рис. 3. Нормальное соударение стержня с алюминиевой преградой ( $t=136,7$  мкс): а – общий вид; б – плоское сечение.

Здесь отчетливо видно, что процесс деформирования и разрушения при нормальном ударе существенно трехмерный, несмотря на начальный осесимметричный характер нагружения преграды и ударника. При заданной скорости стержень деформируется незначительно, а в преграде выбивается небольшая пробка, которая ясно видна на рис. 3, б, и формируется осколочное поле вокруг вылетающего из преграды стержня (рис. 3, а).

Соударение под углом  $20^\circ$  от нормали показано на рис. 4. Здесь и далее размеры элементов системы и материалы контактирующих тел те же самые, кроме диаметра преграды, который в дальнейших расчетах равняется 5,8 см.

В данном случае форма стержня незначительно отличается от исходной и потери устойчивости не наблюдается.

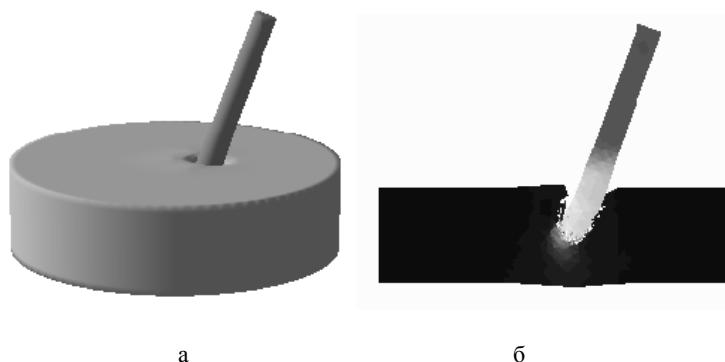


Рис. 4. Соударение стержня с алюминиевой преградой под углом  $20^\circ$  от нормали ( $t=27$  мкс): а – общий вид; б – плоское сечение.

Увеличение угла соударения:  $30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$  приводит к все большему искажению исходной осесимметричной формы стержня и непробитию преграды. В последнем случае стержень даже выходит через лицевую поверхность пластины.

Результаты расчетов соударения стержня под углом 50 градусов к преграде приведены на рисунке 5, где показаны общий вид и плоский разрез.

При взаимодействии стержня с плоским торцом с преградой под различными углами к поверхности [6] потери устойчивости и отклонения формы неразрушенной части стержня от осевой симметрии не наблюдалось. В проведенных в данной работе расчетах показано, что коническая головная часть при углах соударения больше определенного значения приводит к резко выраженному неравномерному обтеканию внедряющегося тела материалом преграды, возникновению асимметричного силового поля и, как следствие, к искривлению стержня и изменению траектории его движения в материале пластины, вплоть до выхода стержня из преграды через лицевую поверхность.

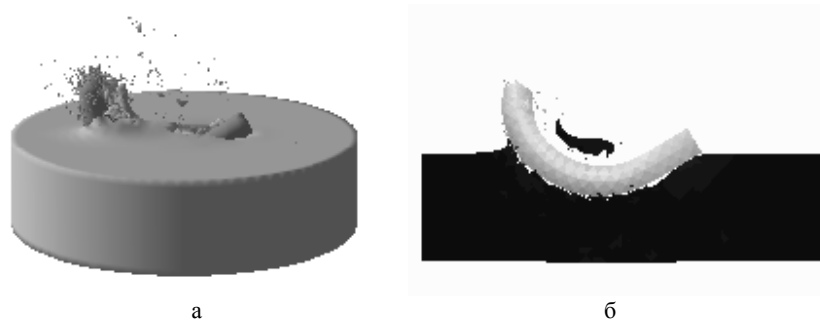


Рис. 5. Соударение стержня с алюминиевой преградой под углом 50 градусов от нормали ( $t=100$  мкс): а – общий вид; б – плоское сечение.

Дальнейшее увеличение угла отклонения стержня от нормали до значения 75 градусов приводит к его рикошетированию (рис. 6).

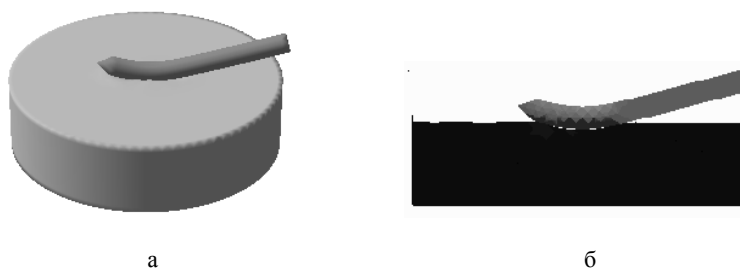


Рис. 6. Соударение стержня из вольфрамового сплава с конической головной частью с алюминиевой преградой под углом 75 градусов от нормали ( $t=33$  мкс): а – общий вид; б – плоское сечение.

Рикошетирование стержня с плоским торцом иллюстрирует рисунок 7. Взаимодействие его с преградой характеризуется разрушением поверхностных слоев, как преграды, так и стержня с формированием облака осколков, движущихся по направлению рикошетирования.



Рис. 7. Соударение стержня из вольфрамового сплава с плоским торцом с алюминиевой преградой под углом 75 градусов от нормали ( $t=52$  мкс): а – общий вид; б – плоское сечение.

Полученные результаты показывают достаточно широкие возможности предложенных вероятностного подхода и численной методики адекватно моделировать не только процессы деформирования и разрушения элементов конструкций при интенсивных динамических нагрузениях, но и такие важные процессы динамического взаимодействия, как рикошетирования ударников. Это подтверждается хорошим совпадением качественных и количественных харак-

теристик представленных в работе численных результатов решения задачи о рикошетировании с экспериментальными данными.

Работа выполнена при частичном финансировании по программе Минобрнауки РФ (проект РНП 2.1.2. 2509) и частичной поддержке грантов РФФИ №09-08-00662а и №10-08-00633а.

1. **Segletis, S.B.** A model for rod ricochet / S.B. Segletis // *Int. J. Impact Eng.* - 2006. - V.32. - P. 1403-1439.
2. **Баум, Ф.А.** Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович, В.П. Челышев, Б.И. Шехтер. - М.: Наука, 1975. - 704 с.
3. **Wilkins, M.L.** Computer simulation of dynamic phenomena/ M.L. Wilkins. - Berlin-Heidelberg-N.Y.: Springer, 1999. – 246 p.
4. **Johnson, G.R.** Tree-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads/ G.R. Johnson, D.D. Colby, D.J. Vavrick // *Int. J. Numer. Methods Engng.* - 1979. - V. 14, № 12. - P. 1865-1871.
5. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. - 572 с.
6. **Герасимов, А.В.** Соударение длинных стержней по нормали и под углом с многослойными и разнесенными преградами/ А.В. Герасимов, С.В. Пашков, В.Н. Михайлов // Сб. статей. 9-й Всерос. научн. конф. “Краевые задачи и математическое моделирование”. - Новокузнецк, 2008. - Т.1. - С. 22-26.