

УДК 539.3

*А.В. ГЕРАСИМОВ, Е.В. ЖАЛНИН, С.В. ПАШКОВ, Ю.Ф. ХРИСТЕНКО***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭТИЛЕНА
ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ¹**

Проведено экспериментальное и численное моделирование процесса взаимодействия полиэтиленового ударника с полиэтиленовой преградой с целью определения влияния высокоскоростного деформирования на физико-механические характеристики (ФМХ) полиэтилена. Предложена методика определения эффективных значений ФМХ при скоростях, характерных для легкогазовых баллистических установок (1–2 км/с). Для численного моделирования использовался трехмерный лагранжев метод и упругопластическая модель для описания поведения материала ударника и преграды при высокоскоростном динамическом нагружении.

Ключевые слова: удар, преграда, 3D-постановка, упругопластическое тело, полиэтилен, эксперимент.

Введение

Экспериментальные исследования баллистических установок, и в частности легкогазовых установок (ЛГУ) с легким поршнем, показали, что существующие представления о внутрибаллистических процессах не всегда соответствуют действительности [1]. Это вызывает необходимость развития экспериментальных методов для более углубленного изучения этих процессов. Одной из основных проблем является адекватное описание движения пластического (как правило, полиэтиленового) поршня в поршневом стволе, и особенно в коническом переходнике. Во многих работах движение поршня в ЛГУ описывалось как движение неньютоновской жидкости [2]. Однако при изучении поршней, которые прошли в прямом и обратном направлении камеры сжатия модельной установки [3], было обнаружено, что помимо следов на ведущих поясках на поршне нет следов контакта с каналом ствола (рис. 1).

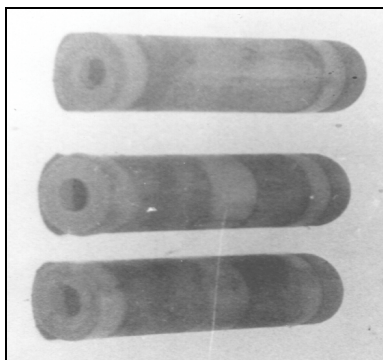


Рис. 1. Вид поршней после модельного эксперимента

Кроме этого, изучение поршней, которые наполовину зашли в конический переходник, показало, что в районе тыльного ведущего пояска также нет явных следов контакта с каналом камеры сжатия. Проведенный анализ показывает, что даже после того, как давление в пороховой камере в несколько раз превысит предел текучести полиэтилена (порядка 150 бар), поршень сохраняет свою форму. Подобные наблюдения и выводы об аномальном поведении поршня при скоростях нагружения, характерных для ЛГУ, приведены в работе [4], где даны также оценки влияния скоростей деформации на физико-механические характеристики материала поршня. Для полиэтилена динамические значения модуля Юнга и предела текучести в десятки раз превышают статические. Подтверждение этому было также найдено на кривых давления в экспериментах на модельной уста-

¹ Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 10-08-00633а и 12-08-00641а.

новке по исследованию движения поршня мимо датчиков давления [5]. В этих экспериментах всплески давления для поршней с двумя ведущими поясками – двугорбые, а с тремя поясками – трехгорбые.

Экспериментальные данные

В данной работе предлагается методика определения эффективных значений ФМХ при скоростях характерных для ЛГУ (1–2 км/с). Суть методики заключается в следующем. Проводится серия экспериментов по соударению ударников из полиэтилена различных размеров по полиэтиленовой преграде со скоростями 1–2 км/с. Расчетным путем определяются размеры получившегося кратера в полиэтиленовой преграде, а именно – его диаметр и глубина (таблица). Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных позволяет подтвердить сделанное выше предположение об упругопластическом характере поведения полиэтиленового поршня при заданных скоростях и амплитудах динамического нагружения.

На рис. 2 и 3 приведена преграда в конце процесса соударения с полиэтиленовым цилиндром. Размеры преграды – 10×10×10 см, ударники-цилиндры имели диаметр 2,3 см и длину 2,3 и 4,6 см. Начальные физико-механические характеристики брались в расчетах, исходя из марки полиэтилена: начальная плотность 0,92 г/см³, модуль сдвига 117 МПа, предел текучести 10 МПа.

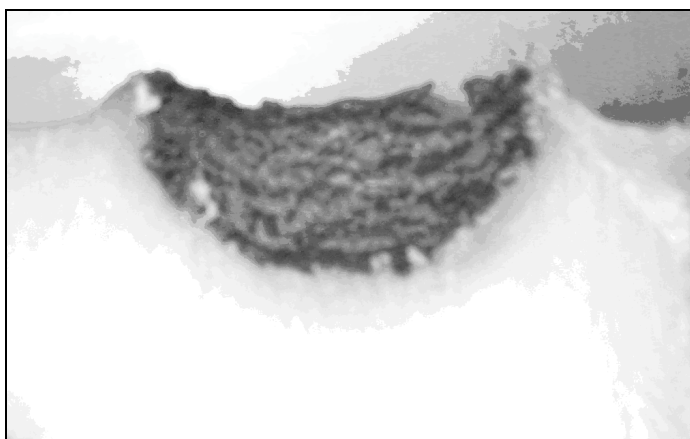


Рис. 2. Разрез преграды после модельного эксперимента. Ударник – полиэтилен диаметром 23 мм, длиной 23 мм, скорость соударения $V = 1379$ м/с

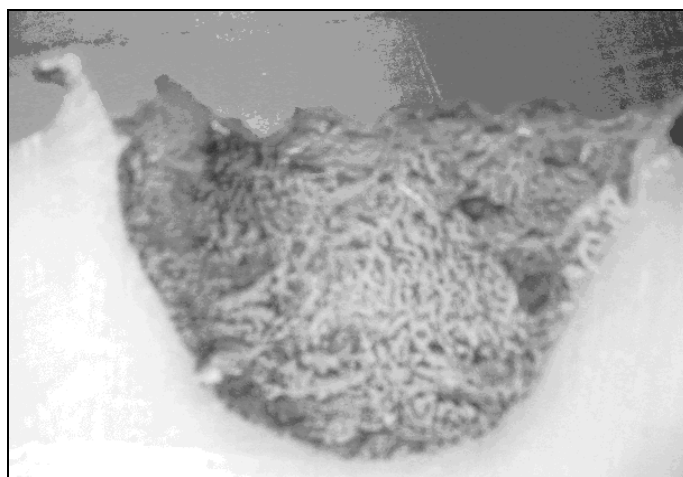


Рис. 3. Разрез преграды после модельного эксперимента. Ударник – полиэтилен диаметром 23 мм, длиной 46 мм, скорость соударения $V = 1629$ м/с

**Зависимость диаметра и глубины кратера от формы и скорости ударников
при соударении полиэтиленовых цилиндров с полиэтиленовой преградой**

Диаметр бойка, мм	Высота бойка, мм	Скорость удара, м/с	Диаметр кратера, мм	Глубина кратера, мм
23,00	23,00	1379	48	20
23,00	23,00	1961	71	31
23,00	46,00	1503	62	50
23,00	46,00	1629	70	47

Результаты численного расчета

В работе в лагранжевой 3D-постановке рассматривается процесс высокоскоростного взаимодействия полиэтиленовых блоков с полиэтиленовыми удлиненными ударниками. Для описания процессов деформирования и разрушения твердых тел используется модель прочного сжимаемого идеально упругопластического тела. Основные соотношения, описывающие движение этой среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии [6–8] и замыкаются соотношениями Прандтля – Рейсса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния берется в форме, предложенной в [6]. Известно, что пластические деформации, давление и температура оказывают влияние на предел текучести и модуль сдвига, поэтому модель дополнялась соотношениями, апробированными в работе [9]. В качестве критерия разрушения при интенсивных сдвиговых деформациях используется достижение эквивалентной пластической деформацией своего предельного значения [6,10].

Для расчета упругопластических течений используется методика, реализованная на тетраэдрических ячейках и базирующаяся на совместном использовании метода Уилкинса [7, 8] для расчета внутренних точек тела и метода Джонсона [11, 12] для расчета контактных взаимодействий.

На рис. 4 приведен 2D-разрез расчетной трехмерной области. Полученные в экспериментах данные по размерам кратеров, сравнивались с результатами численных расчетов по 3D-программе. В эксперименте были получены следующие значения параметров: диаметр кратера равнялся 7,0 см, глубина кратера – 4,7 см. Численные расчеты проводились для ряда значений предела текучести, начиная с исходного равного 10 МПа и до значения равного 26 МПа. Для последней величины предела текучести в численном эксперименте получены следующие результаты: диаметр кратера – 6,92 см, глубина кратера – 4,62 см, и эти значения параметров кратера близки к экспериментальным данным. Следует отметить, что промежуточные, более низкие значения предела текучести, не позволили получить приведенное выше совпадение расчетных и экспериментальных данных. Хорошее совпадение численных результатов и экспериментальных данных подтверждает возможность и необходимость применения модели идеально упругопластического тела к поведению полиэтиленовых поршней при их движении по каналу ствола ЛГУ и соответствующих динамических нагрузках.

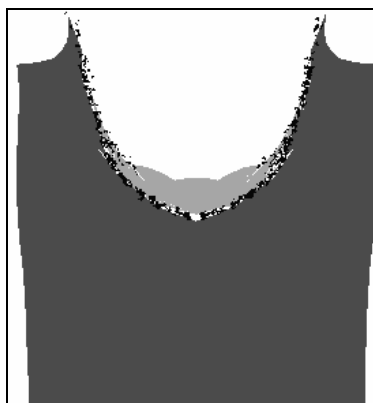


Рис. 4. 2D-разрез преграды для численного трехмерного расчета. Ударник – полиэтилен диаметром 23 мм, длиной 46 мм, скорость соударения $V = 1629$ м/с

Таким образом, решающий вклад в разрушение конического переходника вносит торможение в нем поршня, что, в свою очередь, должно учитываться при разработке конструкций ЛГУ [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христенко Ю.Ф. // Докл. Междунар. конф. «Всесибирские чтения по математике и механике». – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1997. – Т. 2. Механика. – С. 114–122.
2. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутриваллистных процессов в ствольных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 256 с.
3. Аблитаров Э.А., Жаровцев В.В., Христенко Ю.Ф. // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: докл. II конф. РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2003. – С. 211–217.
4. Bogdanoff D. W. and Miller R. J. New Higher-Order Godunov Code for Modelling Performance of Two-Stage Light Gas Guns. NASA TM-110363, 1995. – 45 p.
5. Христенко Ю.Ф. // Фундаментальные и прикладные проблемы совр. механики. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. – С. 173–174.
6. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
7. Уилкинс М.Л. // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212–263.
8. Wilkins M. L. Computer simulation of dynamic phenomena. – Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1999. – 246 p.
9. Steinberg D.J., Cochran S.G., and Guinan M.W. //J. Appl. Phys. – 1980. – V. 51. – No. 3. – P. 1496–1504.
10. Крейнхаген К.Н., Вагнер М.Х., Пьечочки Дж.Дж., Бьорк Р.Л. // Ракетная техника и космонавтика. – 1970. – Т. 8. – № 12. – С. 42–47.
11. Johnson G.R., Colby D.D., and Vavrick D.J. // Int. J. Numer. Methods Eng. – 1979. – V. 14. – No. 12. – P. 1865–1871.
12. Johnson G. R. // Trans. ASME. J. of Appl. Mech. – 1981. – V. 48. – No. 1. – P. 30–34.
13. Христенко Ю.Ф. // Прикладная механика и техническая физика. – 2000. – Т. 41. – № 6. – С. 1.

НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского
Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: ger@mail.tomsknet.ru

Поступила в редакцию 10.07.12.

Герасимов Александр Владимирович, д.ф.-м.н., с.н.с., зав. отделом;
Жалнин Евгений Викторович, инженер;
Пашков Сергей Владимирович, к.т.н., с.н.с.;
Христенко Юрий Федорович, д.т.н., с.н.с., в.н.с.