

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБИТИЯ ПАНЕЛИ КОМПАКТНЫМ УДАРНИКОМ

И.С. Пономарев, С.В. Махнович

Рассматривается проникание сферического ударника в плоскую преграду при различных скоростях соударения. Сформирована конечно-элементная модель деформирования пластины при высокоскоростном воздействии сферического ударника, позволяющая получать характеристики напряженно-деформированного состояния пластины при пробивании с достаточной точностью и при приемлемых затратах времени ЭВМ. Результаты расчета предельных значений толщины пробития пластины удовлетворительно согласуются с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, пластическая деформация, разрушение пластины, метод конечных элементов.

Процесс соударения твердых тел сопровождается упругими деформациями материалов только при относительно малых скоростях, соударяющихся тел. Количественное описание характеристик такого процесса и прогноз его последствий сводится к начально-краевой задаче динамической теории упругости [1]. Однако во многих случаях, представляющих научный и прикладной интерес, скорости соударения таковы, что материал испытывает значительные необратимые деформации и разрушается. При этом задача количественного описания ударного взаимодействия существ-

венно осложняется. Для решения задачи, с одной стороны, требуются сведения о свойствах материала при его неупругом динамическом деформировании и разрушении, а с другой – модельные построения для ее математической формулировки.

Распространенным методом решения такой задачи является метод конечных элементов. Явный метод интегрирования по времени [2, 3, 4] основан на рассмотрении волновых процессов, происходящих в материале. Метод позволяет достаточно корректно моделировать контактные взаимодействия. Могут применяться практически любые модели материала, в том числе с разрушением. Формирование сетки конечных элементов может основываться на подходах Лагранжа и Эйлера.

При обработке сетки конечных элементов с использованием подхода Лагранжа в процессе взаимодействия тел конечные элементы искажаются. Из-за этого могут возникать элементы с одним очень малым размером, вследствие чего произойдет резкое уменьшение шага интегрирования, а время расчета существенно возрастает. Однако достоинством данного метода является простое задание граничных условий и быстрая обработка контактных взаимодействий. Проблема искажения сетки может быть решена периодическим перестроением сетки с интерполяцией деформированной формы, например, методом наименьших квадратов.

При использовании подхода Эйлера сетка конечных элементов в процессе деформирования тел не изменяется и происходит переход материала между элементами сетки. Основным достоинством этого подхода является отсутствие необходимости изменения сетки и возможность получения разрушения объекта без разрушения материала только за счет его пластического течения. Недостатками метода является сложность формирования условий на поверхностях контакта и граничных условий, большое время вычислений.

В работе на основе конечно-элементной модели с использованием подхода Лагранжа исследуется пробитие пластины компактным ударником в диапазоне скоростей соударения 1000–2000 м/с.

Определяется предельная толщина пробития пластины квадратной формы (90×90 мм) из алюминиевого сплава при ударе по нормали к поверхности стальным шариком весом 2,8 грамм (диаметр 9 мм) со скоростями 1000, 1500, 2000 м/с. Механические и физические характеристики алюминиевого сплава пластины: модуль упругости $E=80$ ГПа; коэффициент Пуассона $\mu=0,33$; предел текучести $\sigma_{02}=600$ МПа; предельная пластическая деформация $\varepsilon=0,35$; плотность $\rho =2630$ кг/м³; для сферического стального ударника: плотность $\rho=7850$ кг/м³, модуль упругости $E=0,2$ ТПа; коэффициент Пуассона $\mu=0,3$.

Пластина закреплена по всем торцам. Система ударник – пластина имеет две плоскости симметрии, которые не меняют своего положения в процессе

деформирования. Поэтому моделируется только четверть пластины с наложением соответствующих граничных условий на плоскостях симметрии.

Модели пластины и ударника сформированы из объемных элементов типа SolidHex8. Для стального ударника использовалась линейно упругая модель материала (MAT1), а для пластины - упруго пластическая, кусочно-линейная (MAT24).

Для тестирования расчетной модели пробивания пластины используются экспериментальные данные, опубликованные в работе [10] и результаты расчетов, выполненные по эмпирическим формулам разных авторов [5, 6, 7, 8, 9]. В работе [10] приведены результаты испытаний и определены предельные толщины пробития 17 мм, 23 мм и 28 мм. Сравним их с расчетными данными.

На рисунке 1 показано изменение расчетной скорости ударника при пробивании пластины толщиной 17 мм и начальной скорости ударника 1000 м/с. Видно, что в момент времени $t=0,08$ мс, скорость ударника падает до нуля и он полностью тормозится на уровне нижней плоскости пластины, то есть происходит пробитие пластины.

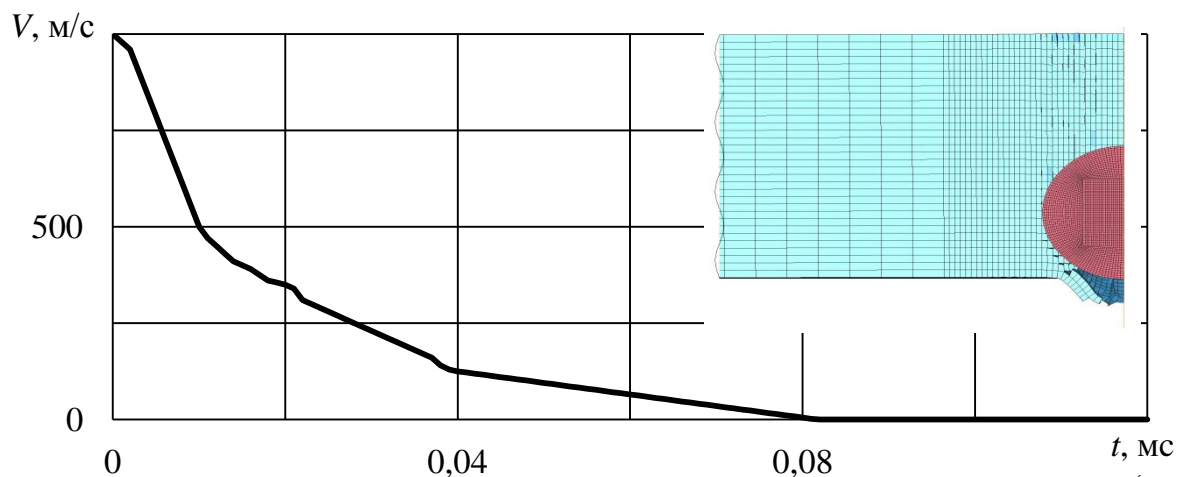


Рис. 1. Изменение скорости ударника во времени при толщине алюминиевой пластины 17 мм и начальной скорости ударника 1000 м/с

На рисунке 2 приведено изменение скорости ударника при ударе в пластину толщиной 23 мм со скоростью 1500 м/с. В момент времени 0,05 мс, показано полное торможение ударника в массиве пластины, и он застревает в ней, как показано на рисунке 3, на расстоянии 0,6 мм от нижней поверхности пластины. Значением предельной толщины пробития такой пластины можно считать 22,4 мм.

И, наконец, на рисунке 4 показано изменение скорости ударника при толщине пластины 28 мм при начальной скорости соударения 2000 м/с. Ударник пробивает пластину насквозь. Запреградная скорость ударника равна 350 м/с.

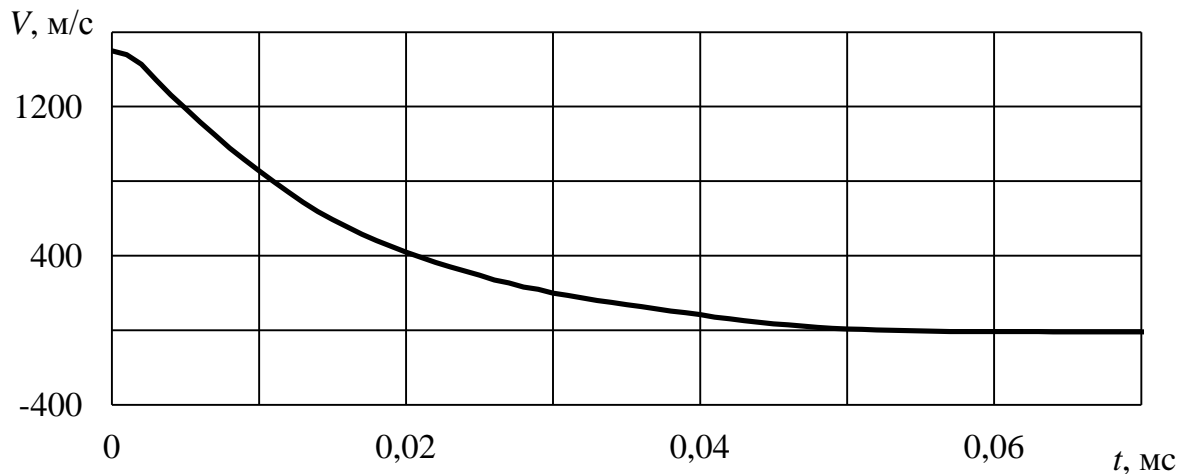


Рис. 2. Изменение скорости ударника во времени при толщине алюминиевой пластины 23 мм и начальной скорости ударника 1500 м/с

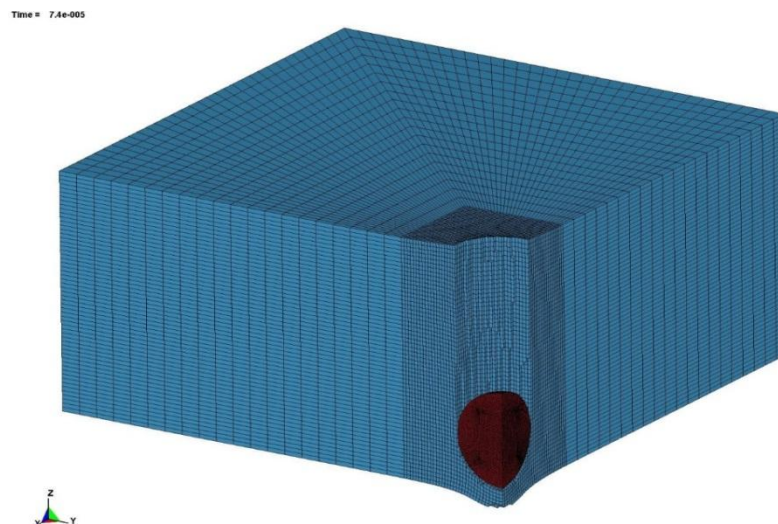


Рис. 3. Застревание ударника в пластине (толщина 23 мм, при начальной скорости ударника 1500 м/с)

Следует отметить что, в расчетной модели пробивания пластины, разрушение материала имитируется способом исключения элементов, деформация которых превышает предельную величину. При исключении таких элементов исчезают так же их масса и энергия. После исключения конечного элемента, находящегося в контакте, между телами возникает зазор, на закрытие которого требуется время. Следовательно, непрерывное взаимодействие тел в контакте заменяется серией последовательных ударов, интенсивность и число которых зависит от размера конечного элемента.

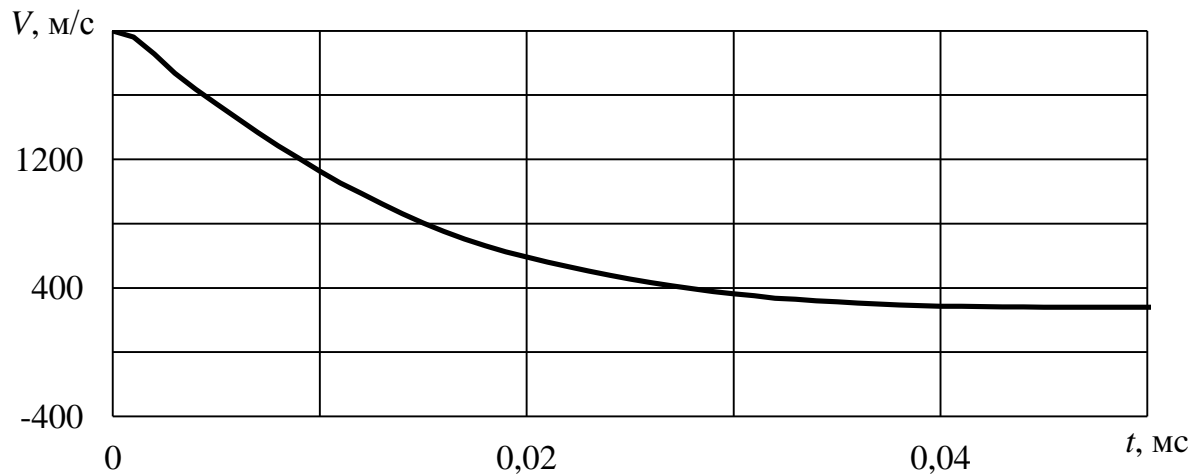


Рис. 4. Изменение скорости ударника во времени при толщине алюминиевой пластины 28 мм и начальной скорости ударника 2000 м/с

Расчетные значения предельных толщин пробития, полученные с помощью сформированной конечно-элементной модели и по полуэмпирическим формулам из работ [5, 6, 7, 8, 9], в сравнении с экспериментальными данными [10] сведены в таблицу.

Таблица
Предельные значения пробиваемых толщин мишени из алюминиевого сплава

№	Формула	Предельная толщина пробития, мм			Источ-ник
		1000	1500	2000	
1	$L_{\infty} = 5,24d^{19/18}HB^{-0,25} \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{2/3} \left(\frac{V_0 \cos \theta}{C_t}\right)^{2/3}$	17	23	27	[5]
2	$\frac{L_{\infty}}{d} = 3,5 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0,3} \left(\frac{V_0}{C_t}\right)^{0,66}$	24	31	37	[6]
3	$\frac{L_{\infty}}{d} \cong 0,47 \left(\frac{\rho_p}{\rho_t}\right)^{0,68} \ln \left(1 + \frac{\rho_t V_0^2}{H_{ДП}}\right)$	12	20	27	[7]
4	$\left(\frac{L_{\infty}}{d}\right) = \left(\frac{\rho_p V_0^2}{\sigma}\right)^{1/6} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_t}}$	18	22	24	[8]
5	$\frac{h_{пред}}{m^{1/3}} = 11,1V_0^{2/3}$	16	21	25,4	[9]
6	Эксперимент	16	22	26	[10]
7	Конечно-элементный метод	17	22,4	34	

Как видно из таблицы, для расчета предельной толщины пробития пластины близкие к экспериментальным данным дают формулы 1,4 и 5. Из этих формул предпочтительна формула 1, так как она дает значения с небольшим запасом. Расчет с помощью конечно-элементного метода также согласуется с экспериментом и с полуэмпирическими формулами. Разница с экспериментом заметно возрастает для скорости 2000 м/с. Однако с помощью конечно-элементной модели можно определять характеристики напряженно-деформированного состояния пластины и развития его во времени.

Таким образом, в работе сформирована, конечно-элементная модель пробития пластины из алюминиевого сплава при воздействии сферического ударника при скоростях 1000–2000 м/с, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными и расчетами, полученными по известным эмпирическим формулам.

Библиографический список

- 1 Никифоровский, В.С. Динамическое разрушение твердых тел: монография / В.С. Никифоровский, Е.И. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979. – 272 с.
- 2 High velocity impact dynamics / edited by J.A. Zukas. – New York: Wiley-Interscience Publication, 1990. – 935 p.
- 3 LS-DYNA keyword users manual / J.O. Hollquist et al. – LSTC, 1999. – Vol. 1–2. – 1130 p.
- 4 LS-DYNA theoretical manual / Compiled by John O. Hollquist. – LSTC, 1998. – 498 p.
- 5 Handbook for Designing MMOD Protection. Prepared by E.L. Christiansen. NASA, 2003. – 111 p.
- 6 Методы динамических расчетов и испытаний тонкостенных конструкций / А.В. Кармишин, А. И. Жуков, В.Г. Колосов и др.; Под ред. А.В. Кармишина. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
- 7 Кинетическое воздействие на летательные аппараты / Э.С. Степанов, Ю.С. Соломонов, М.П. Сычев и др. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – Ч. 1. – 112 с.
- 8 Бадмаев, Р.Л. Гидродинамическая обобщенная модель проникания / Р.Л. Бадмаев, К.Н. Шамшаев // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 396, № 3. – С. 343 – 344.
- 9 Средства поражения и боеприпасы: Учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; Под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 984 с.
- 10 Моделирование удара нелокализованного обломка двигателя по конструкции с использованием MSC.Dytran / А.В. Чернов, А.Н. Виноградова // Труды Российской конференции пользователей систем MSC 2004 года. – М., 2004. – С. 158–178.

[К содержанию](#)