

3. Электрохимический способ оценки пористости электролуженой жести / И. М. Кацер [и др.] // Защита металлов. – 1975. – Т. 11. – № 1. – С. 109–111.

4. Пат. РФ № 2357237 МПК⁷ G01N 27/12. Устройство для интегрального кулонометрического контроля толщины металлических гальванопокрытий с последующим электрохимическим восстановлением / И. С. Черепанов [и др.]. Оpubл. 27.05.09. Бюл. № 15.

5. Шмелева Н. М. Контролер работ по металлопокрытиям. – М. : Машиностроение, 1985.

6. Бокштейн Б. С., Менделев М. И. Краткий курс физической химии. – М. : ЧеРо, 1999.

7. Автоматизированная система интегрального электрохимического контроля коррозионных свойств металлических покрытий / В. В. Тарасов [и др.] // Защита металлов. – 2004. – Т. 40. – № 4. – С. 433–438.

8. Вернигорова В. Н., Макридин Н. И., Соколова Ю. А. Современные химические методы исследования строительных материалов. – М. : АСВ, 2003.

I. S. Cherepanov, PhD in Chemistry, Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. V. Tarasov, DSc in Engineering, Professor, Institute of Applied Mechanics of the Ural Branch of RAS, Izhevsk

Electrochemical Method of Through-Pore Registration in Metal Galvanic Coatings

The method of the express through-pore registration in metal galvanic coatings along with the device for its implementation is proposed on the base of the integral electrochemical control (IEC). The method and device proposed allow raising the productivity, comprehension and functional possibilities of existing methods.

Key words: galvanic coatings, porosity, electrochemical control.

УДК 517.958:52/59

Ю. В. Ганзий, аспирант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

И. В. Романенко, студент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Н. В. Митюков, доктор технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Е. Л. Бусыгина, кандидат физико-математических наук, Камский институт гуманитарных и инженерных технологий, Ижевск

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СНАРЯДА ПРИ ПРОБИВАНИИ ТОНКИХ ПЛАСТИН

Показано, что существующие аналитические методики расчета толщины пробиваемой преграды не подходят для описания движения низкоскоростных пенетраторов в тонких пластинах. С помощью программного продукта ANSYS LS-Dyna проведено моделирование пробивания тонкостенной оболочки недеформируемым шаром, летящим на существенно дозвуковой скорости. Предложен подход, в соответствии с которым для описания пробивания тонких пластин предложено увеличивать коэффициент аэродинамического сопротивления.

Ключевые слова: твердое тело, пенетрация, тонкостенная оболочка, низкоскоростное тело.

Проблема идентификации и реконструкции археологических находок в последнее время вышла на принципиально новый уровень. Если еще лет 15–20 назад эта задача решалась в основном интуитивно, то широкий доступ к универсальному программному обеспечению дал возможность проводить историческую реконструкцию научно обоснованно.

Ранее авторы предложили программный комплекс по реконструкции стрел и снарядов, когда, например, по найденному наконечнику реконструируется стрела в сборе [1]. Для этого необходимы лишь археологические свидетельства, позволяющие оценить энергетику снаряда. Чаще всего в этой роли выступает остеологический материал с застрявшими наконечниками или пулями, который на основе методов криминалистики дает возможность определить кинетическую энергию снаряда в момент удара. Между тем у подобного рода артефактов велик процент

находок, в которых происходит проникновение поражающих элементов в заброневое пространство. На пробивание защиты тратится часть энергии снаряда, из-за чего реконструкция по предложенной методике дает значительную погрешность.

Общие соображения

В идеальном случае, когда вся кинетическая энергия снаряда идет на пробивание преграды, по формулам теоретической механики можно получить зависимость для максимальной толщины пластины T , которую может пробить снаряд массой m

и скоростью v [1]: $T = \sqrt{\frac{m}{2k}}v$. Здесь k – коэффициент

пропорциональности, зависящий от материала пластины. Однако, как показано в работе Н. Окуна [2], в более корректной форме критическую скорость для пробивания заданной преграды лучше считать как

$$v = KC \frac{T^t D^d}{M^m \cos^a \alpha},$$

где K – постоянная; C – коэффициент материала пластины; D – калибр снаряда; α – угол встречи снаряда с преградой; M – масса снаряда. Поскольку, как правило, эта зависимость служит для обработки экспериментальных данных, t , d , m и a – показатели степеней, которые будут отличать одну эмпирическую формулу от другой.

Как видно, для идеального случая эти коэффициенты равны: $t = 1$; $d = 0$; $m = 0,5$; $a = 1$. В формуле Якоба де Марра эти коэффициенты следующие: $t = 0,7$; $d = 0,75$; $m = 0,5$; $a = 1$ [3]. В ряде формул C и $\cos^a \alpha$ объединяются, чтобы определить качество брони при косом ударе, из-за чего в таких формулах отсутствует угол [2].

Наибольшей практической ценностью методик по пробиванию брони обладает определение критических скоростей [3]. При этом существует два баллистических предела, называемые Н. Окуном морским и сухопутным. В первом случае необходимо, чтобы при прохождении преграды снаряд обладал хотя бы минимальной скоростью для выполнения своей задачи в заброневом пространстве (поражение корабля противника). Во втором случае, при поражении танков противника, достаточно достижения носиком снаряда задней кромки брони. В этом случае создаются осколки, выводящие из строя личный состав и материальную часть.

В соответствии с рассмотренными аналитическими моделями пробивания броневых плит [3] под случай тонких пластин может подойти лишь случай пенетрации мягкой конструкционной стали. Поскольку в конце XIX – начале XX в. производство броневых плит малой толщины сопровождалось непреодолимыми технологическими трудностями, на их изготовление шла обычная конструкционная сталь, по терминологии того времени «броня Сименс-Мартин» (мартеповская сталь) [1]. Для оценки пробиваемых конструкций толщиной менее 2,5" Брайnard [4] рекомендует следующую зависимость:

$$T = \frac{Mv}{400D^2} - 1,5.$$

Видно, что в данной формуле нарушается соотношение между пробиваемой броней и кинетической энергией (скорость в первой степени), что можно объяснить сильным торможением снаряда в вязкой преграде, а также небольшой толщиной плит, которые пробиваются навывлет в большинстве случаев. Обращает на себя внимание и постоянный член, отсутствующий в других подобных формулах, вероятнее всего взявшийся как систематическая погрешность.

В качестве примера рассмотрим процесс пробивания тонкого листа толщиной 2,5 мм стальным шариком диаметром 72 мм, массой 1,55 кг. Преобразуя исходные данные к американской системе мер и весов получаем: $M = 3,417$ фунт, $D = 2,8$,

$T = 0,1$ ". В результате критическая скорость для пробития заявленной толщины 459 м/с (1505 фт/с), что является явно завышенным. Отсюда можно сделать вывод, что рассмотренные методики [3] не подходят для низкоскоростных пенетраторов и тонких пластин.

Моделирование пробивания тонкой пластины в ANSYS LS-Dyna

Эта задача была решена с использованием программного пакета ANSYS (процедура LS-Dyna), ранее уже использовавшаяся для решения подобного рода задач [5]. В качестве модели была рассмотрена плоская бесконечная пластина толщиной 2,5 мм. Пластина пробивалась шаром из абсолютно твердого материала (RIGID – «жесткий», 020 модель базы данных LS-Dyna) радиусом 36 мм. Для описания поведения оболочки выбрана модель частично-линейно-пластичного материала (PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY – 024 модель базы данных LS-Dyna). При этом самое неблагоприятное воздействие происходит при прямом ударе, когда траектория ударника и поверхность взаимно перпендикулярны. Так как воздействие на пластину точечное, был рассмотрен квадратный фрагмент поверхности шириной 300 мм, в зоне которого происходят все упругопластические изменения, и анализировался процесс пробивания шаром лишь этого участка.

Были рассмотрены несколько начальных скоростей до 90 м/с. Учитывая возможность упругого действия воздуха вокруг шара, процесс пробития начал моделироваться с удаления шара на 1 мм от оболочки. Результаты моделирования процесса внедрения шара в поверхность пластины представлены на рис. 1. Как показали численные эксперименты, в модельном случае частичная пенетрация («сухопутный баллистический предел», по Н. Окуну), сопровождающаяся пластическими деформациями оболочки, наступает при скоростях свыше 10 м/с, а полная («морской баллистический предел», по Н. Окуну) – при скоростях шарика свыше 89 м/с.

Поскольку в нашей стране наиболее распространена формула расчета пенетрации – формула Якоба де Марра, можно определить постоянную этого уравнения, соответствующую обоим баллистическим пределам:

$$KC = \frac{vM^{0,5}}{D^{0,75}T^{0,7}}.$$

В случае сухопутного баллистического предела $KC = 5900$, морского – $KC = 52800$. В последнем случае коэффициент находится в пределах, рекомендованных [6], – 45000...55000 для тонких стальных листов.

На рис. 2. предоставлены графики изменения энергии пенетратора при разных скоростях. Видно, что условие пробития или непробития можно определить уже на первых секундах удара. В случае пробития зависимость кинетической энергии имеет вогнутый вид с выходом на горизонтальную асимптоту, равную кинетической энергии после пробития.

В случае непробития зависимость имеет выгнутый вид с выходом в ноль во время, когда penetrator прекращает свое движение (рис. 2, а). Поскольку масса в ходе пенетрации остается без изменения, зависимости для изменения скорости качественно повторяют вид функций, изображенных на рис. 2, а, – выгнутый при пробитии, выгнутый при непробитии. На рис. 2, б представлены графики изменения внутренней энергии. И снова при условии пробития или

непробития функции различаются качественно: при пробитии энергия имеет выгнутый вид и выходит на горизонтальную асимптоту, соответствующую уровню энергии при преодолении преграды, а при непробитии энергия имеет вогнутый вид и стремится к бесконечности. Полная энергия, представляющая собой сумму кинетической и внутренней, по функциональному виду напоминает характер кинетической энергии (рис. 2, в).

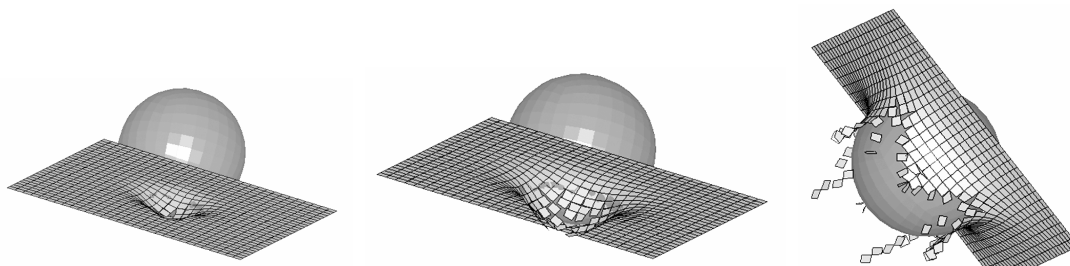


Рис. 1. Процесс пенетрации оболочки в различные моменты времени при начальной скорости 89 м/с

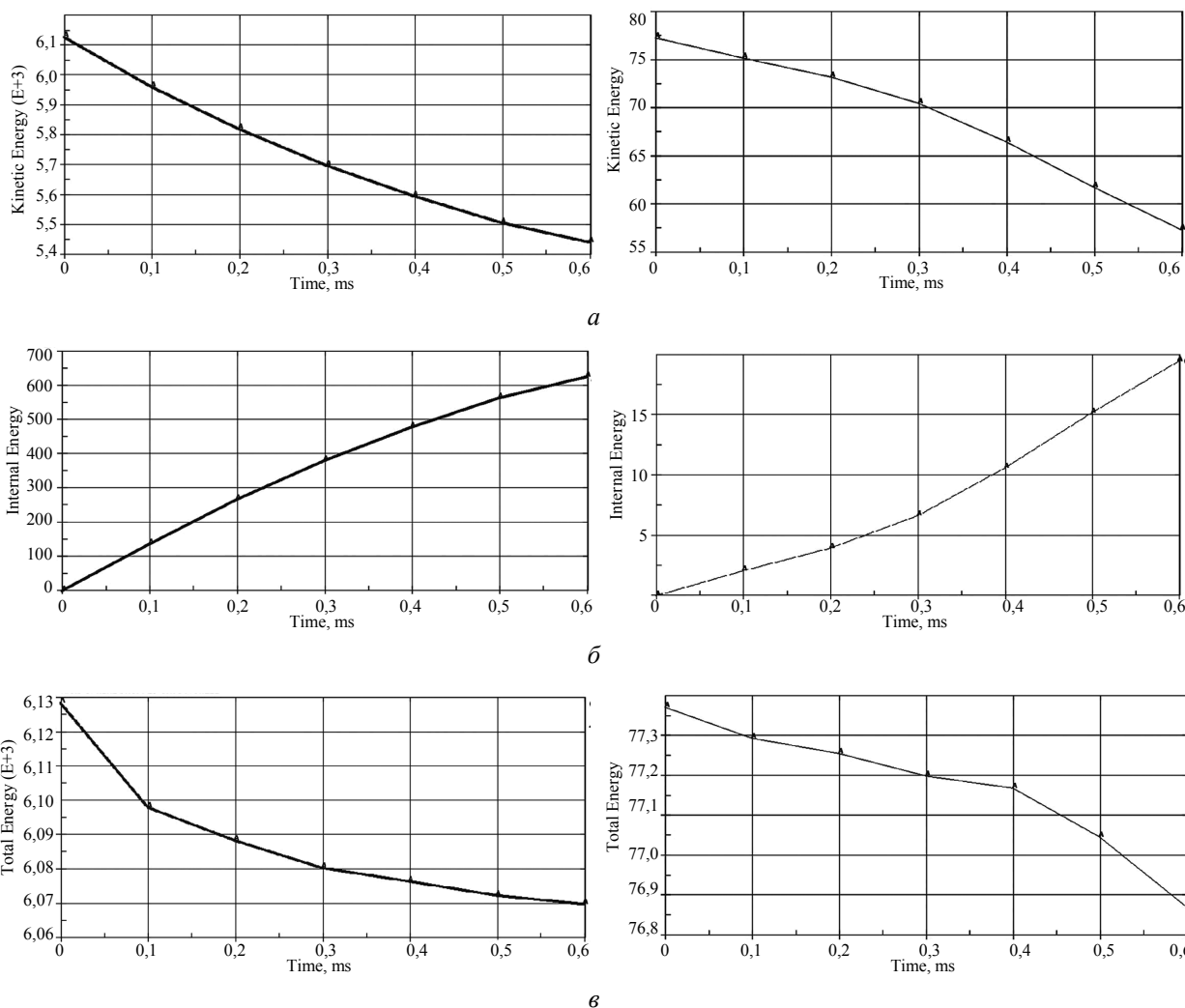


Рис. 2. График изменения кинетической (а), внутренней (б) и полной (в) энергии шара от времени при начальной скорости $v_0 = 89$ м/с (слева) и $v_0 = 10$ м/с (справа)

Для моделирования преодоления преград В. В. Баландиным был предложен подход, при кото-

ром реальная преграда (мягкий грунт) заменяется эффективным увеличением коэффициента лобового

сопротивления c_x [7]. Как показали расчеты в среде ANSYS, это дает удовлетворительные результаты при моделировании динамических зондов [8], дающие удовлетворительную сходимость, кроме средних диапазонов скоростей, когда происходит локальное уплотнение грунта перед головкой зонда [9].

Поскольку величина уменьшения полной энергии в процессе пенетрации пластины равна работе сил сопротивления, появляется возможность определить эффективный c_x . В этом случае, зная зависимость кинетической энергии K от перемещения x , появляется возможность определить текущую скорость v , и значит, определить эффективный коэффициент сопротивления при пробивании пластины, аналогичный коэффициенту аэродинамического сопротивления c_x по известной зависимости [8]:

$$c_x = \frac{4m}{\rho S_m} \frac{v_1 - v_2}{(x_2 - x_1) v_1 + v_2},$$

где ρ – плотность среды; S_m – площадь мишени; m – масса пенетратора; v_1 – скорость в точке x_1 ; v_2 – скорость в точке x_2 .

Результаты расчетов представлены в таблице.

Номер точки	K_i , Дж	x_i , м	$\bar{x} = \frac{x_i}{R}$	v_i , м/с	c_x
0	6130	0,0000	0,0000	88,93637	–
1	5950	0,0067	0,1861	87,62088	1411,889
2	5825	0,0130	0,3611	86,69561	1069,711
3	5690	0,0210	0,5833	85,68509	930,337
4	5598	0,0280	0,7778	84,98956	739,138
5	5500	0,0340	0,9444	84,24235	934,295
6	5450	0,0410	1,1389	83,85856	414,101
					–

Выводы

Существующие аналитические методики расчета толщины пробиваемой преграды не годятся для низкоскоростных пенетраторов и тонких пластин.

В соответствии с предложенной методикой, по которой тонкая пластина заменяется эквивалентным повышением сопротивления среды, эффективный коэффициент сопротивления при пробивании стальной пластины достигает 1412 в начальный момент времени, снижаясь до 414 при вылете пенетратора в пространство за пластиной.

Библиографические ссылки

1. Митюков Н. В. Математические модели и программные средства для реконструкции военно-исторических данных : дис. ... д-ра техн. наук. – Ижевск, 2010. – 373 с.
2. Okun N. Major Historical Naval Armor Penetration Formulae. – URL: <http://www.warships1.com>.
3. Митюков Н. В. Методики определения бронепробиваемости // Морской сборник. – 2008. – № 1. – С. 37–41.
4. Brainard F.R. Blindaje Moderno // Revista General de la Marina. – 1891. – No. 29. – Julio. – P. 47–62.
5. Муїземнек А. Ю., Богач А. А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2005. – 106 с.
6. Средства поражения и боеприпасы / под ред. В. В. Селиванова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 984 с.
7. Баландин В. В. Экспериментальное изучение процессов проникания осесимметричных тел в мягкие грунтовые среды. – Нижний Новгород, 2001.
8. Коробейников А. В., Мингалев В. В., Митюков Н. В. О возможностях динамического зондирования в археологии // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Серия «История. Политология. Экономика». – 2008. – Вып. 7. – № 13(53). – С. 59–66.
9. Митюков Н. В., Ганзий Ю. В. К вопросу о применимости ANSYS LS-DYNE для расчета движения в грунтах // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 1. – С. 121–122.
10. Шапиро Я. М. Внешняя баллистика. – М. : Оборонгиз, 1946. – 408 с.

Yu. V. Ganziy, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

I. V. Romanenko, Student, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

N. V. Mityukov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

H. L. Busygina, PhD (Physics and Mathematics), Kama Institute of Humanitarian and Engineering Technologies

Evaluation of Energy Parameters Reduction for the Projectile at Thin Plates Penetration

It is shown that the existing analytical methods for calculating the thickness of punctured barriers are not suitable to describe the motion of low-speed penetrators in thin plates. The software ANSYS LS-Dyna was applied to simulate the penetration of thin-walled shell by a non-deformable ball possessing a very subsonic speed. An approach was proposed to increase the aerodynamic drag coefficient in order to describe the penetration of thin plates.

Key words: solid, penetration, thin-walled shell, low-velocity solid.