Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0408

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2016. № 11. С. 15–27.

DOI: **10.7463/1116.0850281**

Представлена в редакцию: 02.10.2016
Исправлена: 16.10.2016

УДК 623.093

Влияние параметров алюминиевых сплавов на сопротивление прониканию пуль 7.62 «Шар НАТО» и «АРМ2»

Зузов В. Н.[1,*], Шаш Н.[1]

[*] zuzov@bmstu.ru

[1] МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В данной работе анализировалась проблема влияния основных параметров материала (E- модуль Юнга , B- константа деформационного упрочнения, A- предел текучести, n- коэффициента деформационного упрочнения, m- коэффициент термического размягчения) в модели модифицированного Джонсона Кука на адекватность моделирования проникания пули алюминиевых сплавов и остаточную скорость пули. Были выбраны пули 7,62 х 63 мм «Шар НАТО» (с мягким свинцовым сердечником) и 7,62 х 63 мм «АРМ2» (с жестким стальным сердечником) – как одни из наиболее распространенных и пластинки из алюминиевого сплава AA7075-T651 с двумя толщинами 10 и 30 мм, используемые для бронирования. В заключительной части статьи даны рекомендации по предпочтительному способу моделирования материалов.

Ключевые слова: броня, алюминиевые сплавы, пуля, модифицированный Джонсон –Кук, параметры материала, LS-DYNA, конечно-элементная модель

Введение

Для бронирования используются материалы такие как сталь, алюминиевые сплавы, керамические и другие. В настоящее время использование алюминиевых сплавов возрастает из-за их легкости, жесткости, прочности и стойкости к коррозии. Проведено не мало экспериментальных, аналитических и численных исследований алюминиевых мишеней для того, чтобы понять механизм воздействия и установить методологию моделирования для прогнозирования поведения от воздействий пуль. При этом численные исследования этих задач основываются на методах Джонсона Кука или модифицированного Джонсона Кука применительно к различным видам алюминиевых сплавов и боеприпасов [1,2,3,4,5,6,7]. Однако только лишь небольшая часть из них посвящена исследованию влияния параметров материалов на остаточную скорость и механизм разрушения [3].

В нашей работе мы проанализировали проблему влияния основных параметров материала (E, B, A, n, и m) на результаты моделирования методом конечных элементов (на базе модифицированного метода Джонсона Кука) процесса проникания наиболее распространенных пуль 7,62 x 63 мм «Шар НАТО» (с мягким свинцовым сердечником) и 7,62 x 63 мм «АРМ2» (с жестким стальным сердечником) пластинки из алюминиевого сплава AA7075-T651 с двумя толщинами 10 и 30 мм, используемых в бронезащите.

Цель нашего исследования - определить степень влияния параметров алюминиевых сплавов в конечно-элементном моделировании высокоскоростного удара пулей на остаточную скорость пули при ее проникании через бронепластину и выработать рекомендации по их назначению при подборе алюминиевых сплавов.

Модель Джонсона–Кука и модифицированного Джонсона–Кука

При моделировании соударения объектов важную роль играет описание пластических эффектов в материале. Модель Джонсона–Кука (JC) позволяет учитывать высокую скорость деформации, большую по величине деформацию и температурные воздействия, но не учитывает повышение температуры за счет адиабатического состояния при высокой скорости деформации события [5]. Модифицированная версия Джонсона-Кука (MJC) учитывает адиабатическое нагревание, высокую скорость деформации и большие эффекты деформации, поэтому эта модель используется в нашем исследовании.

Модель MJC определяет следующее соотношение для эквивалентного напряжения (напряжение по Мизесу) [1,2] $\sigma_{эк}$:

$$\sigma_{эк} = (A + B\varepsilon_{эк}^{n})(1 + \dot{\varepsilon}_{эк}^{*})^{C}(1 - T^{*m}) , \qquad (1)$$

где $\varepsilon_{эк}$ — эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}_{эк}^{*} = \dot{\varepsilon}_{p}/\dot{\varepsilon}_{0}$ — нормированная эквивалентная скорость пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_{0}$ — справочная скорость деформации, полученная в квазистатических испытаниях; A, B, n, c, m — константы, зависимые от материала; $\boldsymbol{T}^{*}$ — гомологическая температура:

$$T^{*} = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} , \qquad (2)$$

где: T_r– комнатная температура; T_m – температура плавления.

Изменение температуры из-за адиабатического нагревания вычисляется по формуле [1]:

$$\Delta T = \int_0^{\varepsilon_{эк}} \chi \frac{\sigma_{эк} d\varepsilon_{эк}}{\rho C_p} , \qquad (3)$$

где: ρ - плотность материала, C_p - удельная теплоемкость, χ - коэффициент Тейлора-Куни (представляет собой долю пластической работы превращаемой в тепло).

Для описания разрушения материала в пакете LS-DYNA, применяемого в работе как решатель, используется критерий предложенный Кокрофтом и Латом [1].

Значения параметров материала AA7075-T651 и пули, относящиеся к модели модифицированного Джонсона–Кука, взятые из публикаций [1,3], приведены в таблицах 1,2,3,4.

Таблица 1. Общие параметры для модифицированного Джонсона-Кука в пуле

Материалы	E, МПа	ϑ	ρ[кг/м^3]	C_p[Дж/кгК]	χ	α[К$^{-1}$]	T_c^*
Все стальные сплавы	210000	0.33	7850	452	0.9	1.2×10^{-5}	0.9
Свинцовый сердечник и заглушка	1000	0.42	10660	124	0.9	2.9×10^{-5}	0.9
Латунная оболочка	115000	0.31	8520	385	0.9	1.9×10^{-5}	0.9

Таблица 2. Параметры модифицированного Джонсона-Кука в пулях

Материалы	Предел текучести	Деформационное упрочнение		Скорость деформационного упрочнения		Температура размягчения			Критерий Кокрофта и Лата
	A, МПа	B, МПа	n	$\epsilon_0^*[s^{-1}]$	C	$T_r[K]$	$T_m[K]$	m	W_{cr}[МПа]
Жесткий стальной сердечник	1200	50000	1	5×10^{-4}	0	293	1800	1	-
Свинцовый сердечник и заглушка	24	300	1	5×10^{-4}	0.1	293	760	1	175
Латунная оболочка	206	505	0.42	5×10^{-4}	0.01	293	1189	1.68	914

Таблица 3. Общие параметры для модифицированного Джонсона-Кука

Материалы	E, ГПа	ϑ	ρ[кг/м^3]	C_p[Дж/кгК]	χ	α[К$^{-1}$]	T_c^*
AA7075-T651	71.7	0.33	2810	910	0.9	2.3×10^{-5}	0.9

Таблица 4. Параметры модифицированного Джонсона-Кука в пластинках

Материал	Предел текучести	Деформационное упрочнение		Скорость деформационного упрочнения		Температура размягчения			Критерий Кокрофта и Лата
	A, МПа	B, МПа	n	$\epsilon_0^*[s^{-1}]$	C	$T_r[K]$	$T_m[K]$	m	W_{cr}[МПа]
AA7075-T651	520	477	0.52	5×10^{-4}	0.001	293	893	1.61	106

Идентификация основных материальных параметров

Пять материальных параметров необходимы для определения эквивалентного напряжения для модели MJC. В первых трех параметрах (A- предел текучести материала (МПа), B- константа деформационного упрочнения (МПа) и n - коэффициент деформационного упрочнения) описывают упруго-пластическую деформацию материала, в четвертом и пятом параметрах (C - коэффициент скорости деформации и m - коэффициент термического размягчения) отражают скорость деформации воздействия и температурные воздействия [5].

Чтобы оценить влияние вышеуказанных параметров на процесс проникновения пули в алюминиевых сплавах, мы будем исследовать влияние изменения каждого из параметров (A,B,n,m) и модуля Юнга на остаточную скорость и механизм разрушения для алюминиевого сплава (табл. 3 и 4). В наших численных испытаниях использовались значения, приведённые в табл. 5, причем, начальные значения заданы для сплава AA7075-T651.

Таблица 5. Значения параметров, используемые при моделировании

Номер модели и изменяемый параметр в модели		Номер расчета и значение параметра				
		AA7075-T651	**1**	**2**	**3**	**4**
МКЭ1	E, ГПа	71.7	68	70	73	75
МКЭ2	A, МПа	520	100	300	700	900
МКЭ3	B, МПа	477	300	400	600	700
МКЭ4	n	0.52	0.2	0.4	0.6	0.8
МКЭ5	m	1.61	0.5	1	2	2.5

Численное моделирование

Как указывалось, в данной работе исследуется процесс проникания пуль 7,62 х 63 мм «Шар НАТО» (с мягким свинцовым сердечником) и 7,62 х 63 мм «АРМ2» (с жестким стальным сердечником) пластинок из алюминиевого сплава AA7075-T651, который имеет самое большое сопротивление проникновения, с двумя толщинами 10 и 30 мм последовательно.

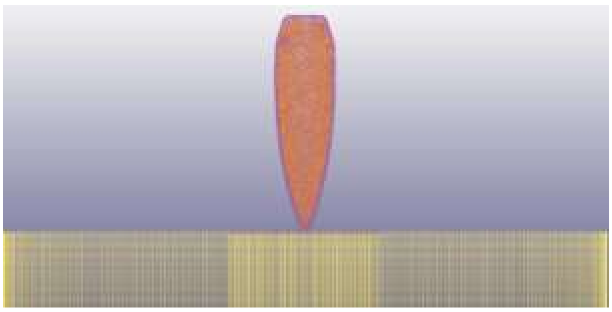
Расчеты проводились для разных конечно-элементных моделей (КЭМ) с использованием значений параметров, приведенных в табл. 5, в следующей последовательности:

Первый случай: пуля 7.62 мм «Шар НАТО», пластина толщиной 10 мм , рис.1.а.

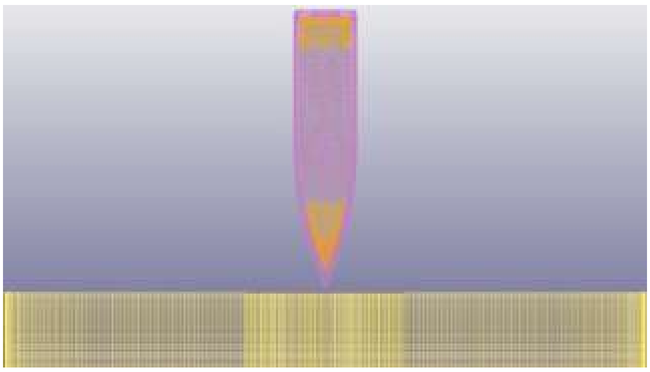
Второй случай: пуля 7.62 мм «АРМ2», пластина толщиной 10 мм, рис.1.б.

Третий случай: пуля 7.62 мм «Шар НАТО», пластина толщиной 30 мм, рис.1.в

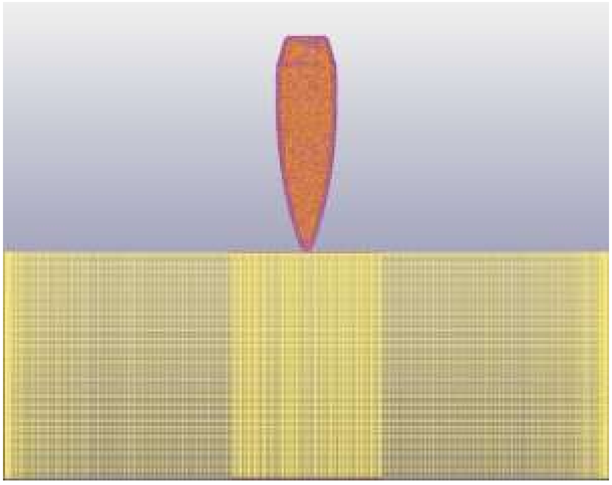
Четвёртый случай: пуля 7.62 мм «АРМ2», пластина толщиной 30 мм, рис.1.г.

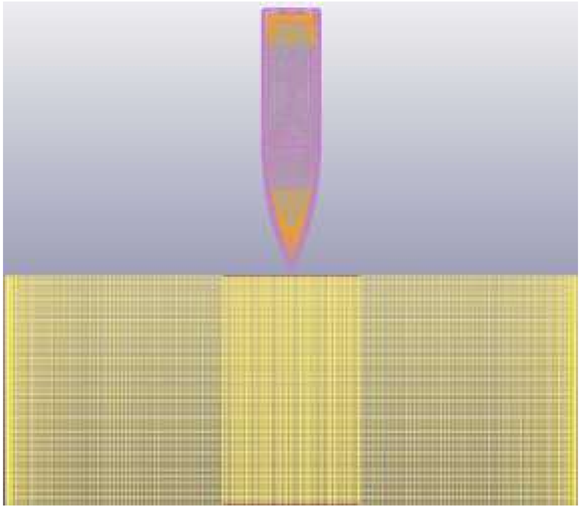


а



б





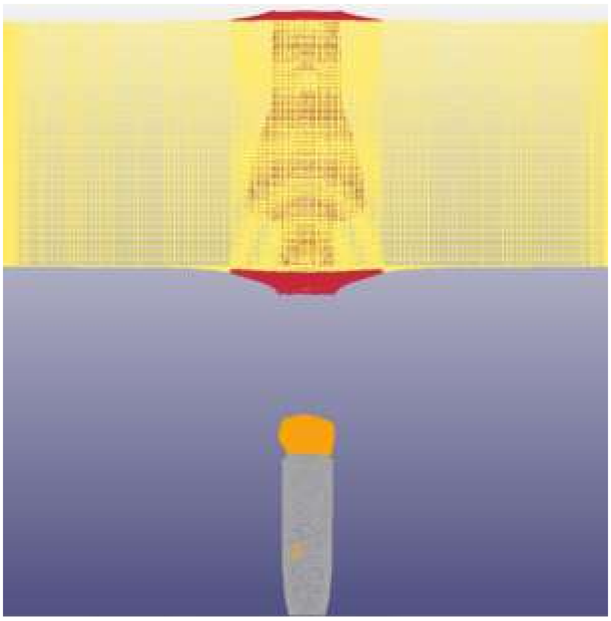
в г

Рис.1. КЭМ пули и пробиваемой пластины

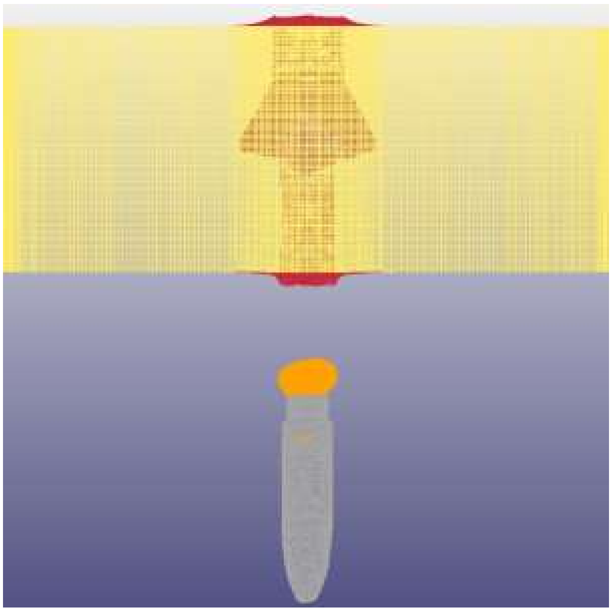
Результаты исследований

В данной работе мы провели 20 численных расчетов для каждой модели (рис.1) и различных значений параметров, которые представлены в таблице 5.

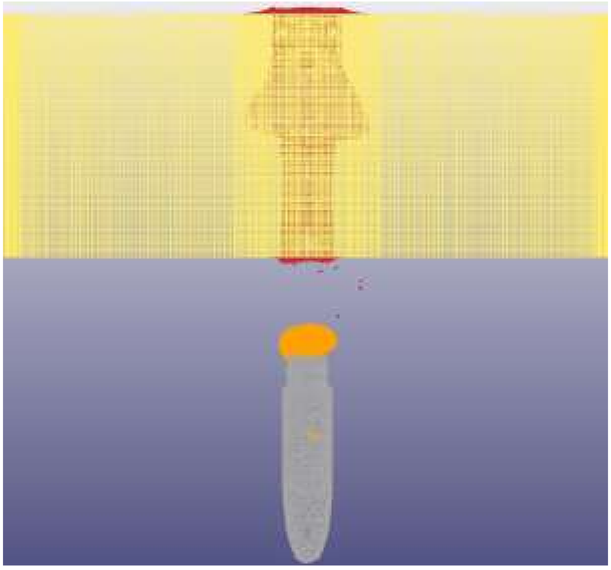
Для иллюстрации изменений механизма разрушения при использовании различных значений предела текучести выбрана модель "г" (рис.1), дающая наиболее наглядные результаты (рис.2).



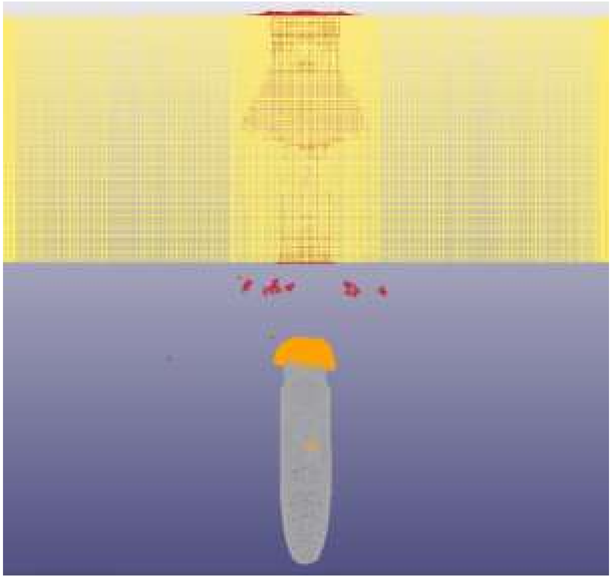
а) A= 100 [МПа]



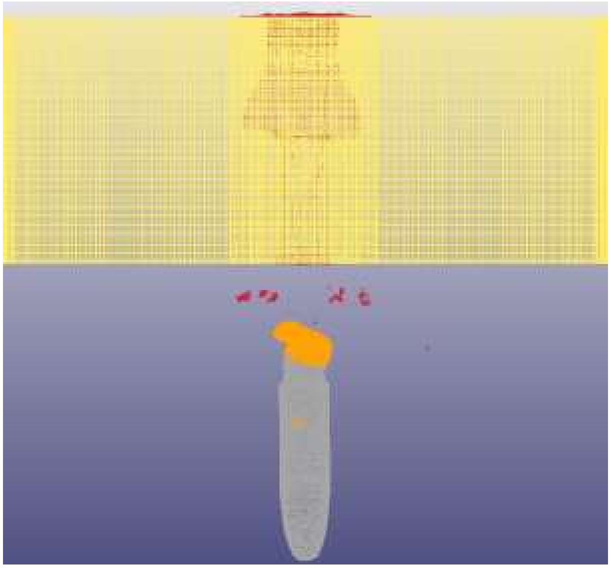
б) A= 300 [МПа]



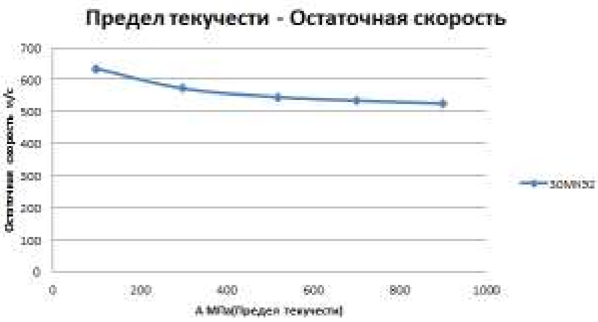
в) A= 520 [МПа]



г) A= 700 [МПа]



д) A= 900 [МПа]



е) Остаточная скорость при изменении пределе текучести

Рис.2. Механизм разрушения при изменении предела текучести в случае "г"

Из анализа результатов следует, что при малых значениях модуля упругости сопротивление проникновению меньше, чем при больших значениях и остаточная скорость больше и нет осколков. В то время как при больших значениях предела текучести наблюдаются осколки из пластинки и остаточная скорость меньше.

Далее мы исследуем влияние каждого из следующих параметров материала на остаточную скорость:

а) Влияние модуля Юнга (Е)

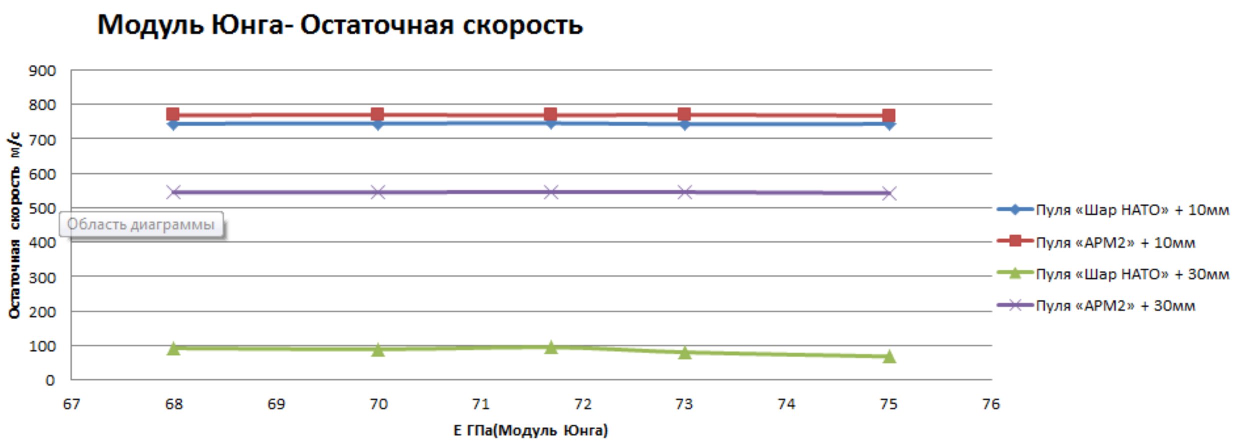


Рис.3. Влияние модуля Юнга на остаточной скорости

Из рис.3 видно, что влияние модуля Юнга на остаточную скорость мало и заметно лишь при проникновении пули «Шар НАТО» через пластину толщиной 30 мм (кривая 3, рис. 3).

Изменение значения остаточной скорости пули в процентном отношении при изменении модуля Юнга между 68 и 75 ГПа следующее:

- 0.3% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 10 мм;
- 0.24% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 10 мм;
- 3.2% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 30 мм;
- 0.39% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 30 мм.

б) Влияние предела текучести (А)

Влияние изменения величины предела текучести на остаточную скорость в пластине с толщиной 10 мм незначительно. При большей толщине (30 мм) ее влияние на остаточную скорость увеличивается и особенно в случае использования пули ««Шар НАТО» (рис.4).

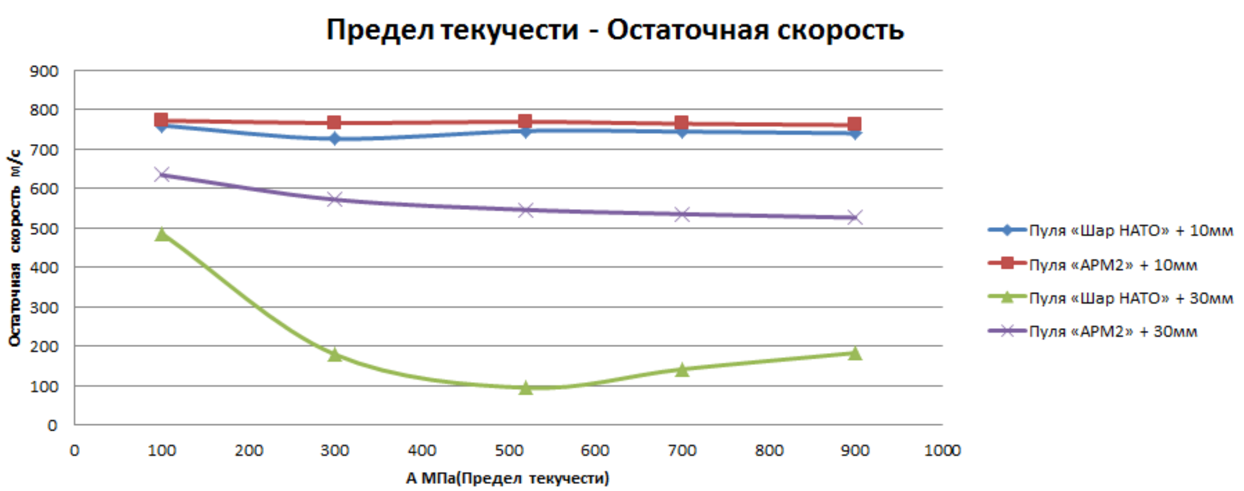


Рис.4. Влияние предела текучести на остаточной скорости

В процентном отношении изменение остаточной скорости пули между наибольшим и наименьшим значениями значения предела текучести (от 100 до 900 МПа) составляет:

- 4.1% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 10 мм;
- 1.32% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 10 мм;
- 47.16% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 30 мм;
- 13.04% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 30 мм.

в) Влияние константы деформационного упрочнения (B)

Из рис.5 видно, что влияние константы деформационного упрочнения (при изменении величины константы деформационного упрочнения от 400 до 600 МПа) на остаточную скорость слабое для пластины толщиной 10 мм (при использовании пули «АРМ2»), и заметное для пластины толщиной 30 мм (для пули «Шар НАТО»).

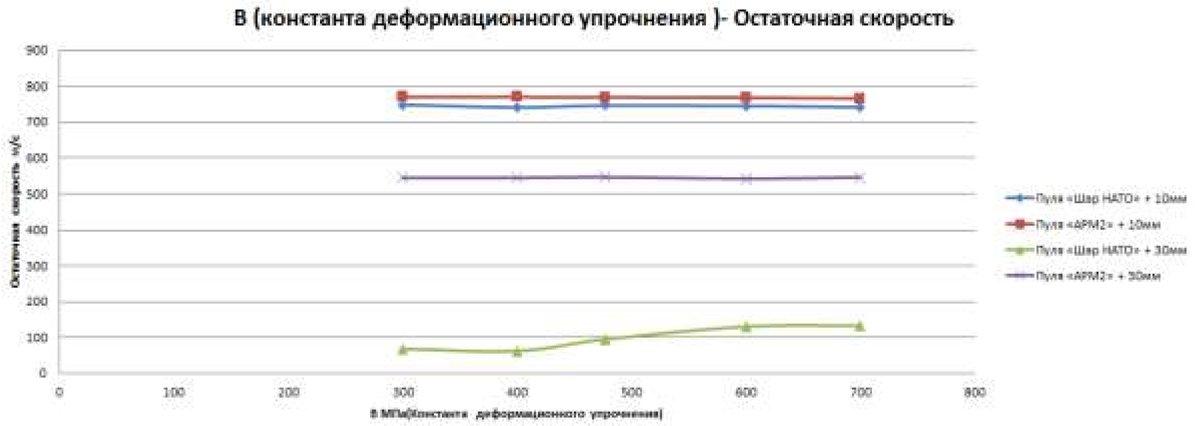


Рис.5. Влияние константы деформационного упрочнения на остаточную скорость

В процентном отношении изменение остаточной скорости пули следующее:

- 0.83% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 10 мм;
- 0.47% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 10 мм;
- 8.5% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 30 мм;
- 0.48% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 30 мм.

г) Влияние коэффициента деформационного упрочнения (n)

Влияние коэффициента деформационного упрочнения заметно лишь для пластины с толщиной 30 мм при проникании пули «АРМ2» (Рис. 6).

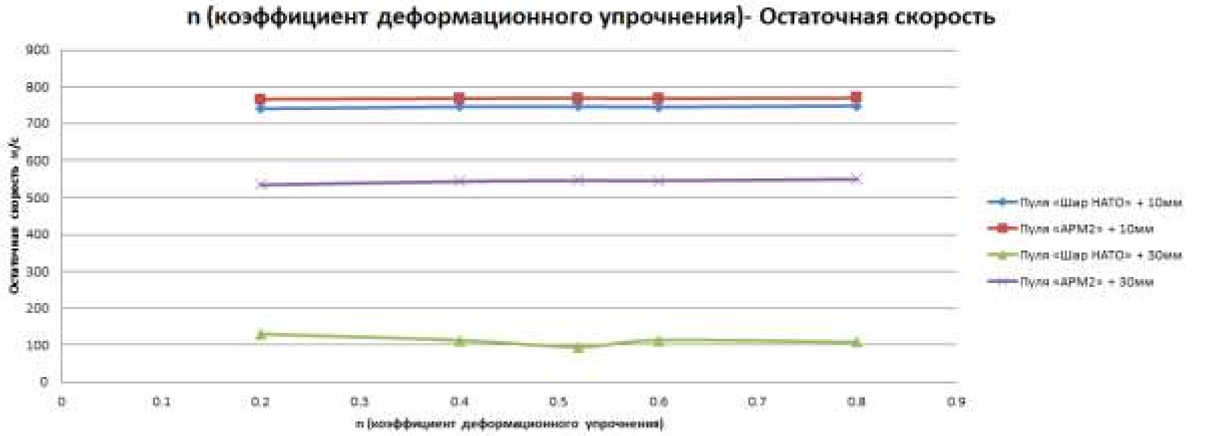


Рис.6. Влияние коэффициента деформационного упрочнения на остаточную скорость

В процентном отношении изменение остаточной скорости пули (при изменениях значений коэффициента деформационного упрочнения от 0.2 до 0.8) следующее:

- 0.89% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 10 мм;
- 0.39% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 10 мм;
- 4.2% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 30 мм;
- 1.9% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 30 мм.

г) Влияние коэффициента термического размягчения (m)

Влияние коэффициента термического размягчения на остаточную скорость пули заметно при толщине пластины 30 мм и пули «Шар НАТО».

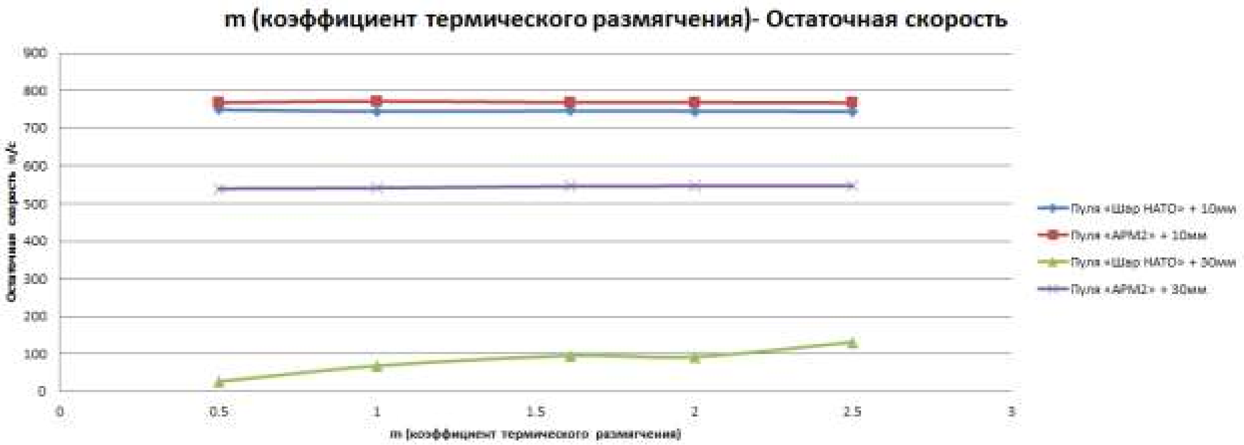


Рис.7. Влияние коэффициента термического размягчения на остаточную скорость

В процентном отношении изменение остаточной скорости пули (при изменениях значений коэффициента термического размягчения от 0.5 до 2.5) следующее:

- 0.52% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 10 мм;
- 0.47% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 10 мм;
- 12.63% - пуля «Шар НАТО» и толщина пластинки 30 мм;
- 0.77% - пуля «АРМ2» и толщина пластинки 30 мм.

Выводы по работе

На основе проведённых исследований, мы можем сделать следующие выводы:

1. Предел текучести является параметром, который в наибольшей степени влияет на величину остаточной скорости.

2. В случае взаимодействия пули и мишени из мягкого материала (например, свинец - алюминиевый сплав), в большинстве случаев изменение значения остаточной скорости не пропорционально изменению значений параметров.

3. При малых толщинах алюминиевых сплавов (до 10 мм) влияние изменения параметров на остаточные скорости незначительно (при проникании пуль «Шар НАТО» и «APM2»).

4. Если остаточная скорость пули уменьшается (при изменениях любого параметра), то это сопровождается увеличением осколков из мишени (при проникновении пули).

Список литературы

1. Børvik T., Olovsson L., Sumita Dey, Langseth M. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates // Intern. J. of Impact Engineering. 2011. Vol. 38. Iss. 7. Pp. 577–589. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001
2. Børvik T., Forrestal M.J., Warren T.L. Perforation of 5083-H116 Aluminum Armor Plates with Ogive-nose Rods and 7.62 mm APM2 Bullets // SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics 2009 (1-4 June, 2009, Albuquerque, New Mexico, USA): Proceedings. Red Hook: Society for Experimental Mechanics, 2009. Vol. 4. Pp. 2247-2273.
3. Jorgensen K.C., Swan V. Modeling of Armour-piercing Projectile Perforation of Thick Aluminium Plates // 13th Intern. LS-DYNA Users Conf. (8-10 June, Dearborn). 2014. Pp. 1-1 – 1-15.
4. Khan S.H., Iqbal M.A., Senthil K., Ansari R., Gupta N.K. Ballistic Response of 1100-H14 Thin Aluminum Plates against Blunt and Conical Nose Projectiles // 4th Intern. Conf. on Impact Loading of Lightweight Structures (12-16 Jan., 2014, Cape Town, South Africa): Conference papers. 2014. 5 p. DOI: 10.13140/2.1.2205.4400
5. Liu Z.S., Swaddiwudhipong S., Islam M.J. Perforation of steel and aluminum targets using a modified Johnson-Cook material model // Nuclear Engineering and Design. 2012. Vol. 250. Pp. 108-115. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.026
6. Manes A., Serpellini F., Pagani M., Saponara M., Giglio M. Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets // Intern. J. of Impact Engineering. 2014. Vol. 69. Pp. 39–54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.010

7. Damith Mohotti, Tuan Ngo, Sudharshan N. Raman, Priyan Mendis. Analytical and numerical investigation of polyurea layered aluminium plates subjected to high velocity projectile impact // Materials & Design. 2015. Vol. 82. Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.05.036

Science & Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2016, no. 10, pp. 15–27.

DOI: **10.7463/1116.0850281**

Received: 02.10.2016
Revised: 16.10.2016

Impact of Aluminum Alloy Parameters on Penetration Resistance of the Bullets 7.62 «Ball NATO» and «ARM2»

V.N. Zuzov[1,*], N. Shash[1]

[*]zuzov@bmstu.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: armour, aluminium alloys, bullet, modified Johnson-Cook, material parameters, LS-DYNA, finite element model

The paper analyses the impact of the main parameters of material (E - Young's modulus, B - constant of strain hardening, A - yield strength, n - coefficient of strain hardening, m - coefficient of thermal softening) in the Johnson Cook modified model on the simulation adequacy of the bullet penetration of aluminium alloys and on the residual velocity of a bullet.

Under study was a penetration process of the bullets 7.62 x 63 mm with a soft lead core and a hard steel core of the plates from AA7075-T651 aluminium alloy, which has high resistance to penetration, with two thicknesses of 10 mm and 30 mm, sequentially. In this study we performed 20 numerical calculations for four models and different values of parameters.

As a result, the values of residual velocity and failure mechanisms for each test have been presented. It follows from the analysis that the yield strength is a parameter, which has the most effect on the residual velocity value (and the Young's modulus essentially, does not impact on the value of the residual velocity). Besides, we note that for small thicknesses of aluminium alloys (up to 10 mm), the varying parameters have a little effect on the residual velocity (for penetrating bullets with the soft lead core and the hard steel core).

References

1. Børvik T., Olovsson L., Sumita Dey, Langseth M. Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *Intern. J. of Impact Engineering*, 2011, Vol. 38, iss. 7, pp. 577–589. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.02.001
2. Børvik T., Forrestal M.J., Warren T.L. Perforation of 5083-H116 Aluminum Armor Plates with Ogive-nose Rods and 7.62 mm APM2 Bullets. *SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics 2009* (1-4 June, 2009, Albuquerque, New Mexico, USA): Proceedings. Red Hook: Society for Experimental Mechanics, 2009, vol. 4, pp. 2247-2273.

3. Jorgensen K.C., Swan V. Modeling of Armour-piercing Projectile Perforation of Thick Aluminium Plates. *13th Intern. LS-DYNA Users Conf.* (8-10 June, Dearborn). 2014, pp. 1-1 – 1-15.
4. Khan S.H., Iqbal M.A., Senthil K., Ansari R., Gupta N.K. Ballistic Response of 1100-H14 Thin Aluminum Plates against Blunt and Conical Nose Projectiles. *4th Intern. Conf. on Impact Loading of Lightweight Structures* (12-16 Jan., 2014, Cape Town, South Africa): Conference papers. 2014. 5 p. DOI: 10.13140/2.1.2205.4400
5. Liu Z.S., Swaddiwudhipong S., Islam M.J. Perforation of steel and aluminum targets using a modified Johnson-Cook material model. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, vol. 250, pp. 108-115. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.06.026
6. Manes A., Serpellini F., Pagani M., Saponara M., Giglio M. Perforation and penetration of aluminium target plates by armour piercing bullets. *Intern. J. of Impact Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 39–54. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.02.010
7. Damith Mohotti, Tuan Ngo, Sudharshan N. Raman, Priyan Mendis. Analytical and numerical investigation of polyurea layered aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. *Materials & Design,* 2015, vol. 82, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.05.036