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

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2017. № 01. С. 1–19.

DOI: **10.7463/0117.0000922**

Представлена в редакцию: 08.12.2016
Исправлена: 22.12.2016

УДК 623.093

Численное моделирование проникания пуль стрелкового оружия в пластины из алюминиевых сплавов с использованием модифицированной модели Джонсона–Кука

Шаш Н.[1], Зузов В.Н.[1,*]

[*] zuzov@bmstu.ru

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

В работе исследуется процесс пробития пулями 7,62 x 63 мм «Шар НАТО» (с мягким свинцовым сердечником) и 7,62 x 63 мм «АРМ2» (с жестким стальным сердечником) трех видов алюминиевых пластин, а именно AA5083-H116, AA6082-T4, и AA7075-T6 с тремя различными толщинами 10 мм, 20 мм, 30 мм и со скоростью удара 830 м/с во всех тестах. Все пластины и пуля были смоделированы как деформируемые с модифицированным конститутивным отношением Джонсона-Кука и критерием разрушения Кокрофта-Латама. Основные результаты расчетов включают остаточную скорость пули и остаточную кинетическую энергию пули после пробития пластины и прогнозирование механизма разрушения пластины. Также было исследовано влияние размера конечного элемента в конечно-элементной модели на длительность и результаты расчетов.

Ключевые слова: броня, алюминиевые сплавы, пуля, модифицированный Джонсон –Кук, критерий Кокрофта-Латама, LS-DYNA, конечно-элементная модель

Введение

Численное моделирование играет важную роль для разработки бронезащиты конструкций, поскольку позволяет сэкономить время, а также затраты благодаря сокращению числа повторяющихся натурных испытаний. Точное и реалистичное моделирование проблем, включающих проникновение пуль и осколков с высокой скоростью, в таких задачах представляет сложную и важную задачу.

Существует большое количество уравнений, которые используются для описания пластического поведения материалов в зависимости от деформационного упрочнения, скорости деформационного упрочнения и температуры. Задача заключается в проблеме объединения их. С помощью модифицированного метода Джонсона-Кука такое объединение реализовано, причем в одно уравнение [1,2], который мы также используем в нашей работе.

В опубликованных исследованиях [1,2,6] было изучено сопротивление прониканию пули в пластину одного типа алюминиевого сплава, и в большинстве из них используются конечно-элементные модели (КЭМ) плоские, составленные из плоских (оболочечного типа) конечных элементов (КЭ) [1,6]. Представлено сравнение между конкретным алюминиевым и конкретным стальным сплавами [6], но сравнение между различными сплавами алюминия освещено недостаточно полно.

В нашей статье исследовалось пробитие пластин из алюминиевых сплавов AA5083-H116, AA6082-T4, и AA7075-T6, используемых для бронезащиты, трех различных толщин (10 мм, 20 мм, 30 мм) со скоростью удара 830 м/с во всех тестах пулями 7,62 мм «Шар НАТО» (с мягким свинцовым сердечником) и 7,62 мм «APM2» (с жестким стальным сердечником), которые являются наиболее распространенными. Для проведения расчетов разработана модель пули для решателя LS-DYNA.

Размер конечного элемента в конечно-элементной модели играет важную роль в численном моделировании высокоскоростного удара. С уменьшением размера элемента возрастает точность результатов, но одновременно увеличивается время решения задачи. С учетом того, что продолжительность решения составляет несколько часов, этот вопрос требует дополнительного изучения.

Цель работы состоит в разработке рациональной модели исследования пробития пулей пластин из алюминиевых сплавов (с определением рациональных параметров модели), обеспечивающей получение результатов с приемлемой точностью и минимальным временем решения.

Спецификация пластинок и пули

Деформируемые алюминиевые сплавы делятся на семь основных классов [3]. В нашем исследовании мы использовали три класса AA5xxx, AA6xxx и AA7xxx, применяемых для бронезащиты, из которых мы выбрали AA5083-H116, AA6082-T4 и AA7075-T651 как наиболее перспективные.

Пуля

В данной работе используется два типа пули 7.62 [мм] «Шар НАТО» и «APM2» как наиболее распространенных в мире. Описания геометрии этих типов пуль приведено на рис.1.

Пуля «Шар НАТО» имеет мягкий свинцовый сердечник с латунной оболочкой. Свинец (Pb) сплавлен с 10% сурьмы (Sb) для увеличения прочности сердечника.

Пуля «APM2» имеет жесткий стальной сердечник, изготовленный из инструментальной стали 1007. Она состоит из латунной оболочкой, заглушки, заполнителя свинца и жесткого стального сердечника. Общая масса пули «Шар НАТО» составляет около 9,5 г, а общая масса пули APM2 составляет около 10,5 г [1,4,5].

Рис.1. Пуля «Шар НАТО» 7.62 [мм] (слева) и 7.62 [мм] «APM2» (справа)

Модифицированная модель Джонсона–Кука

При моделировании соударения объектов важную роль играет описание пластических эффектов в материале. В работе используются модифицированная версия метода Джонсона-Кука (MJC) для моделирования мишени и пули как наиболее подходящая к подобным задачам [1]. Данная 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.

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

$$W = \int_{0}^{\varepsilon_{эк}} < \sigma_1 > d\varepsilon_{эк} \leq W_{cr} , \qquad (2)$$

где σ_1 - наибольшее главное напряжение, $< \sigma_1 >= \sigma_1$ когда $\sigma_1 \geq 0$ и $< \sigma_1 >= 0$ когда $\sigma_1 < 0$; W_{cr} - общая пластическая работа при разрушении.

Значения параметров материалов алюминиевых сплавов и пули, относящиеся к модифицированной модели Джонсона–Кука, взятые из публикаций [1,2,5,6,7,8,9], приведены в таблицах 1,2,3,4.

Таблица 1. Общие параметры для модифицированной модели Джонсона-Кука в пуле

Материалы	**E, МПа**	$\boldsymbol{\vartheta}$	$\boldsymbol{\rho}$[кг/м^3]	C_p[Дж/кгК]	$\boldsymbol{\chi}$	$\boldsymbol{\alpha}$[К$^{-1}$]	$\boldsymbol{T_c^*}$
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 модифицированной модели Джонсона-Кука в пулях

Материалы	**Предел текучести**	**Деформационное упрочнение**		**Скорость деформационного упрочнения**		**Температура размягчения**			**Критерий Кокрофта и Лата**
	A, МПа	**B, МПа**	**n**	$\boldsymbol{\epsilon_0^*[s^{-1}]}$	**C**	$\boldsymbol{T_r[K]}$	$\boldsymbol{T_m[K]}$	**m**	$\boldsymbol{W_{cr}}$[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 модифицированной модели Джонсона-Кука

Материалы	**E, ГПа**	$\boldsymbol{\vartheta}$	$\boldsymbol{\rho}$[кг/м^3]	C_p[Дж/кгК]	$\boldsymbol{\chi}$	$\boldsymbol{\alpha}$[К$^{-1}$]	$\boldsymbol{T_c^*}$
AA5083-H116	70	0.3	2660	910	0.9	2.3×10^{-5}	0.9
AA6082-T4	70	0.3	2700	910	0.9	2.3×10^{-5}	0.9
AA7075-T651	71.7	0.33	2810	910	0.9	2.3×10^{-5}	0.9

Таблица 4. Параметры модифицированной модели Джонсона-Кука в пластинках

Материалы	**Предел текучести**	**Деформационное упрочнение**		**Скорость деформационного упрочнения**		**Температура размягчения**			**Критерий Кокрофта и Лата**
	A, МПа	**B, МПа**	**n**	$\boldsymbol{\epsilon_0^*[s^{-1}]}$	**C**	$\boldsymbol{T_r[K]}$	$\boldsymbol{T_m[K]}$	**m**	$\boldsymbol{W_{cr}}$[МПа]
AA5083-H116	167	596	0.551	5×10^{-4}	0.001	293	893	0.859	215
AA6082-T4	72.6	435.3	0.227	5×10^{-4}	0.001	293	893	1	199
AA7075-T651	520	477	0.52	5×10^{-4}	0.001	293	893	1.61	106

Численное моделирование

Пуля и область в пластинке, которая подвергается наибольшим деформациям были смоделированы с использованием 8-узловых конечных элементов постоянного напряжения (8-node constant-stress elements) с одной точкой интегрирования (One point integration)

[11]. Размер КЭ выбираем равным 0.2 мм в области воздействия и 0.3 мм в пуле на основе проведенных предварительных расчетов. При этом КЭМ пластины толщиной 20 мм имеет в центральной зоне – зоне воздействия диаметром 20 мм около 840900 элементов (рис. 2), вычислительное время составляет около 138 мин (пуля «Шар НАТО» и материал AA6082-T4) при работе на ЭВМ с процессором Intel core с тактовой частотой 3,5 ГГц.

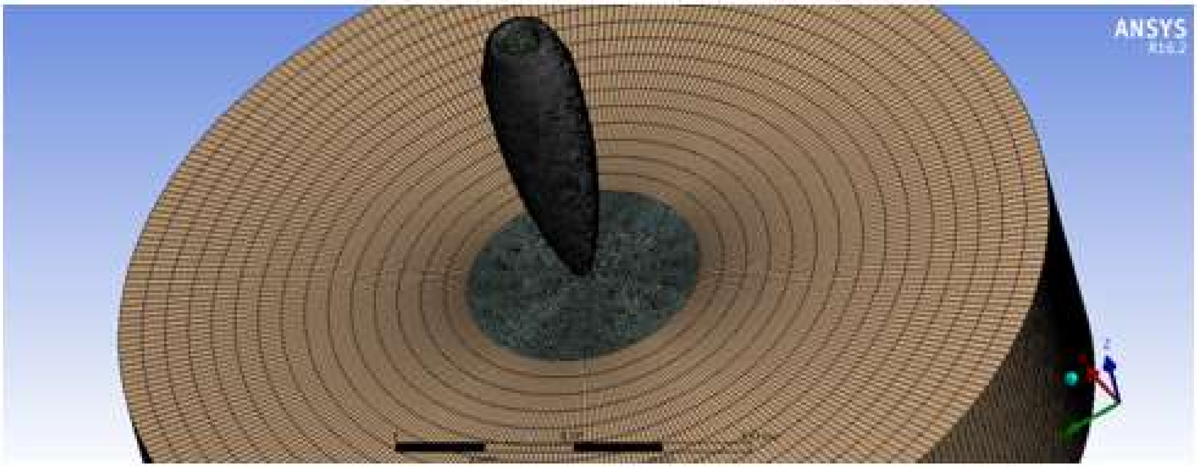

Рис.2. КЭМ пули и пробиваемой пластины

В таблице 4 показано количество элементов, количество узлов и вычислительное время для различных толщин и двух типов пули, используемых в этой работе для КЭМ с моделью зоны воздействия в виде круга.

Таблица 4. Характеристики моделей

Толщина	**Мишень и пуля НАТО / APM2**		**Материалы**	**Вычислительное время [мин]**	
	Число элементов	**Число узлов**		**Шар НАТО**	**APM2**
10	964295/999082	731145/682664	AA5083-H116	59	149
			AA6082-T4	51	138
			AA7075-T651	69	144
20	1625245/2028604	1400075/1720694	AA5083-H116	141	351
			AA6082-T4	138	340
			AA7075-T651	158	412
30	2284645/2277304	2067660/1971376	AA5083-H116	279	499
			AA6082-T4	313	519
			AA7075-T651	297	467

Для изучения влияния не только размеров элементов на результаты решения моделирования высокоскоростного удара, но и формы КЭ, мы использовали другую КЭМ с областью воздействия в виде квадрата, чтобы получить похожие элементы (размер элемента в пуле остается таким же - 0.3 мм). При этом мы задавали размеры сторон КЭ следующие: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.2; 0.5; 1[\text{мм}]$ (табл. 5, рис3).

Таблица 5. Характеристики моделей

Варианты решений	Центр мишени 20X20[мм] ;S=20[мм]			Пуля «Шар НАТО»		
	Размер элемента	Число элементов	Число узлов	Размер элемента	Число элементов	Число узлов
1	0.2	1000000	1030301	0.3	316345	62229
2	0.5	64000	68921	0.3	316345	62229
3	1	8000	9261	0.3	316345	62229

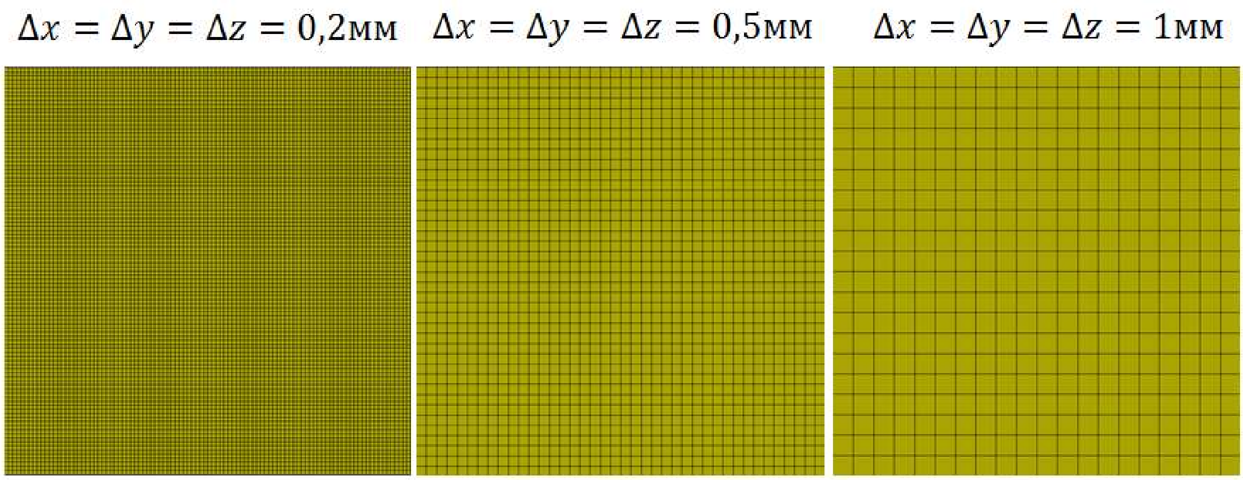

Рис.3. Виды сеток КЭ в области воздействия для трех различных размеров элементов

Начальная скорость пули 830 м/с моделируется *INITIAL_VELOCITY_GENERATION, а взаимодействие между пулей и мишенью моделируется без трения *CONTACT_ERRODING SURFACE TO SURFACE [11].

Модель материала (реализующая уравнения (1) и (2) для модифицированного метода Джонсона–Кука) в LS-Dyna_ *MAT_MODIFIED_JOHNSON_COOK (материал типа 107).

Для определения временных границ расчетов в LS-Dyna предварительно определили общее время пробития пластин пулей, которое составляет 70 мкс для пластины толщиной 10мм, 90 мкс для толщины 20мм и 120 мкс в случае толщины 30 мм.

Эти условия использованы для всех вариантов исследований.

Результаты исследований

Результаты исследований сравнивались с экспериментальными и расчетными данными, опубликованными в работе [1], в которой представлены значения остаточной скорости около 640 м/с для проникновения пули «Шар НАТО» сквозь пластину 20 мм из алюминиевого сплава АА6082-Т4, и представлен механизм разрушения пластины в этом случае.

Два критерия разрушения были использованы при этом моделировании. Первый критерий, предложенный Кокрофтом и Латамом (2), и второй - используемый для моделирования разрушения элементов при достижении критической температуры $T_c = T \leq T_m$ [2,11].

Расчеты проводились для двух вариантов, первый: пуля «Шар НАТО» и второй: пуля «APM2».

Первый вариант: пуля «Шар НАТО»

Расчеты проводились для пластин толщиной 10 мм 3-х типов алюминиевых сплавов. Результаты представлены на рис. 4 - 6.

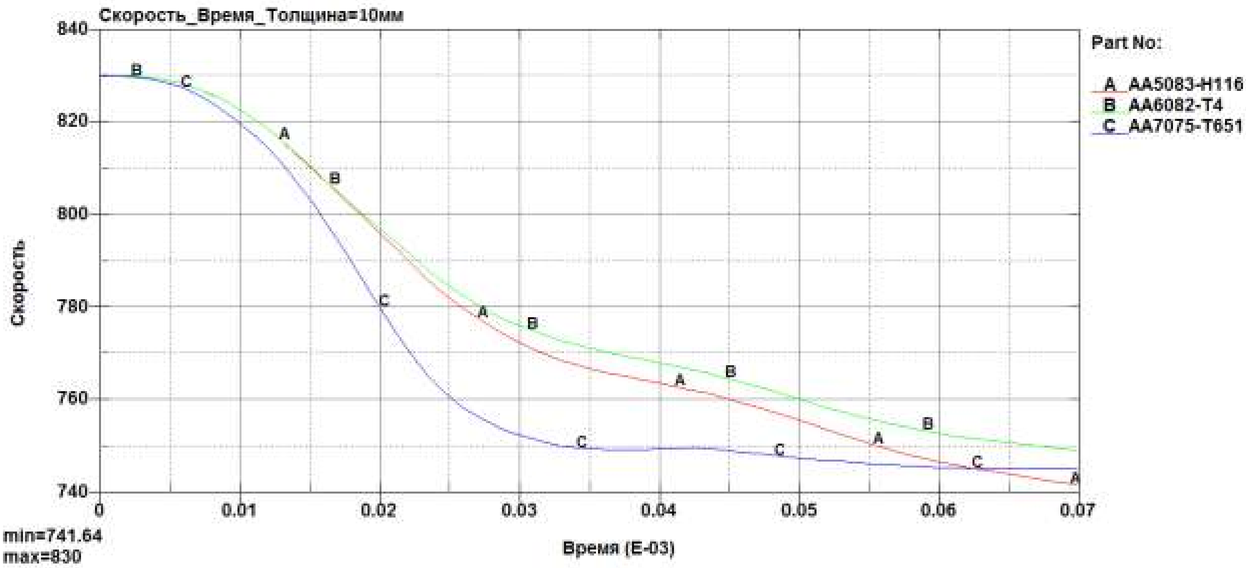

Рис.4. Остаточная скорость пули «Шар НАТО» после проникания

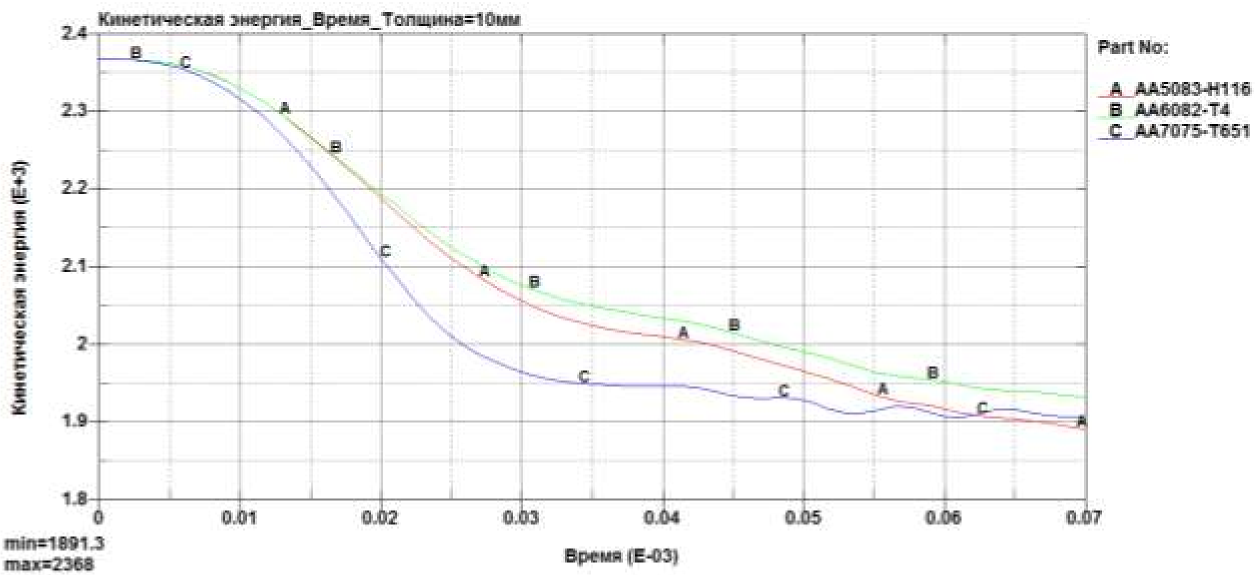

Рис.5. Диссипация кинетической энергии пули «Шар НАТО»

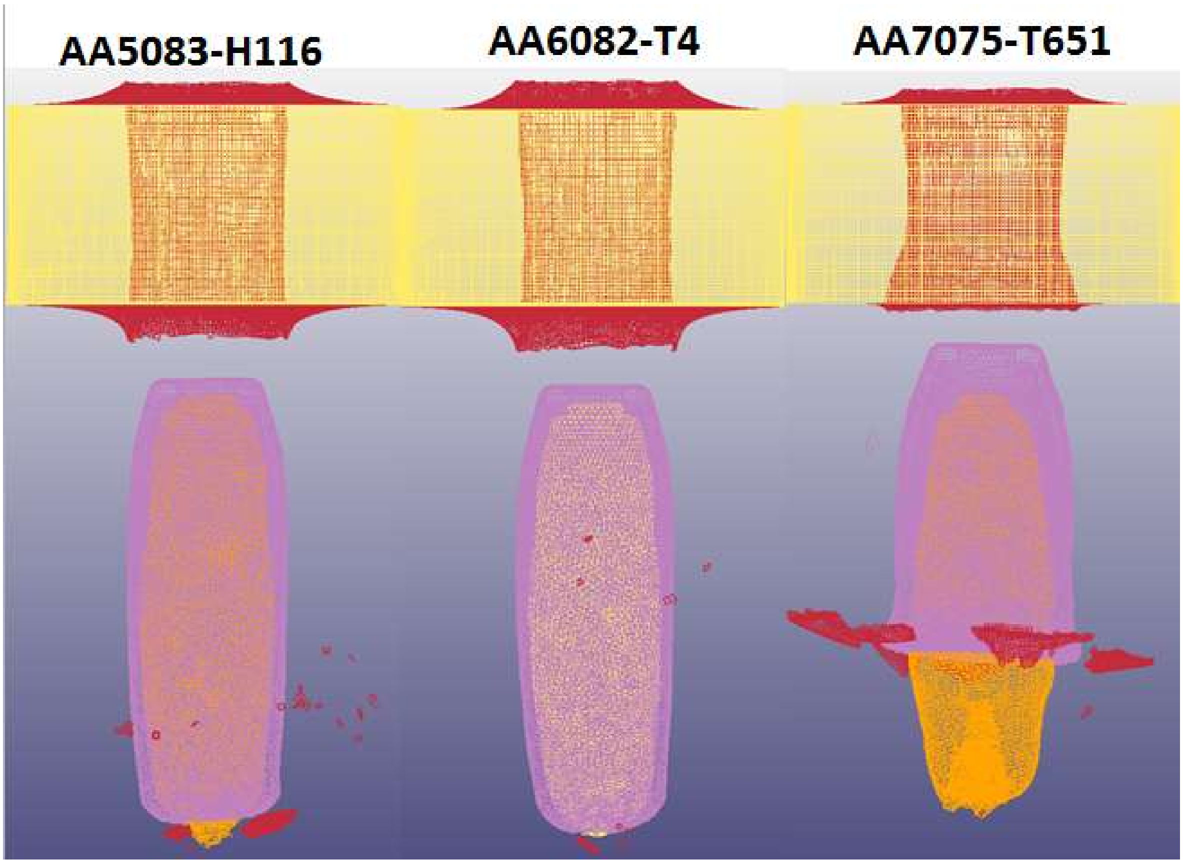

Рис.6. Процесс проникания пули «Шар НАТО»

При толщине пластин 20 мм для каждого типа алюминиевых сплавов результаты показаны на рис. 7 - 9.

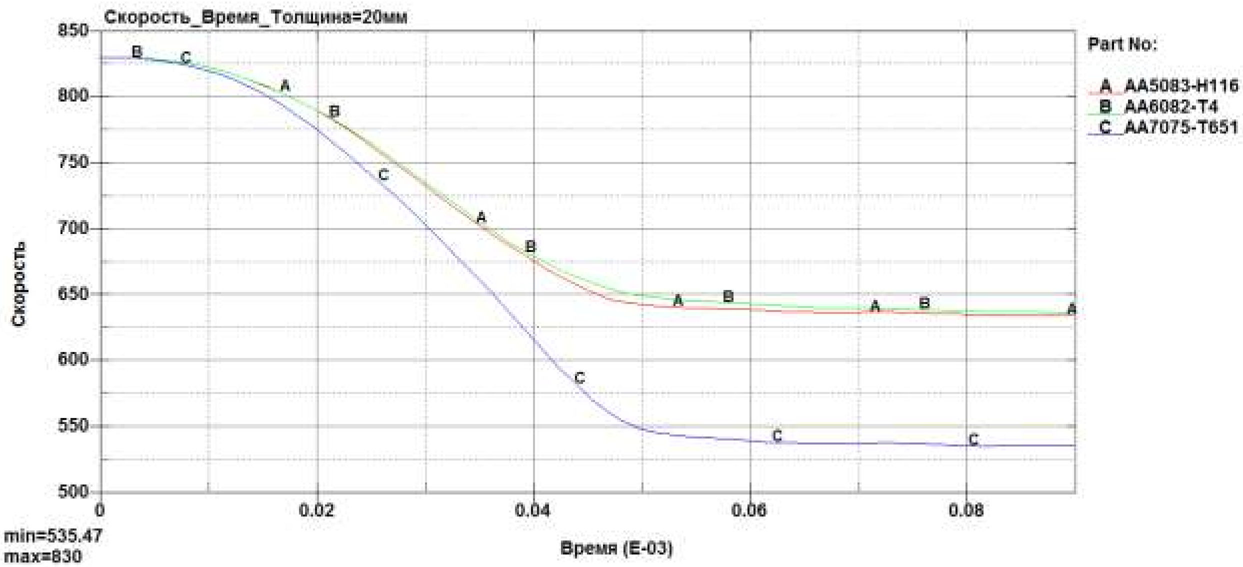

Рис.7. Остаточная скорость пули «Шар НАТО»

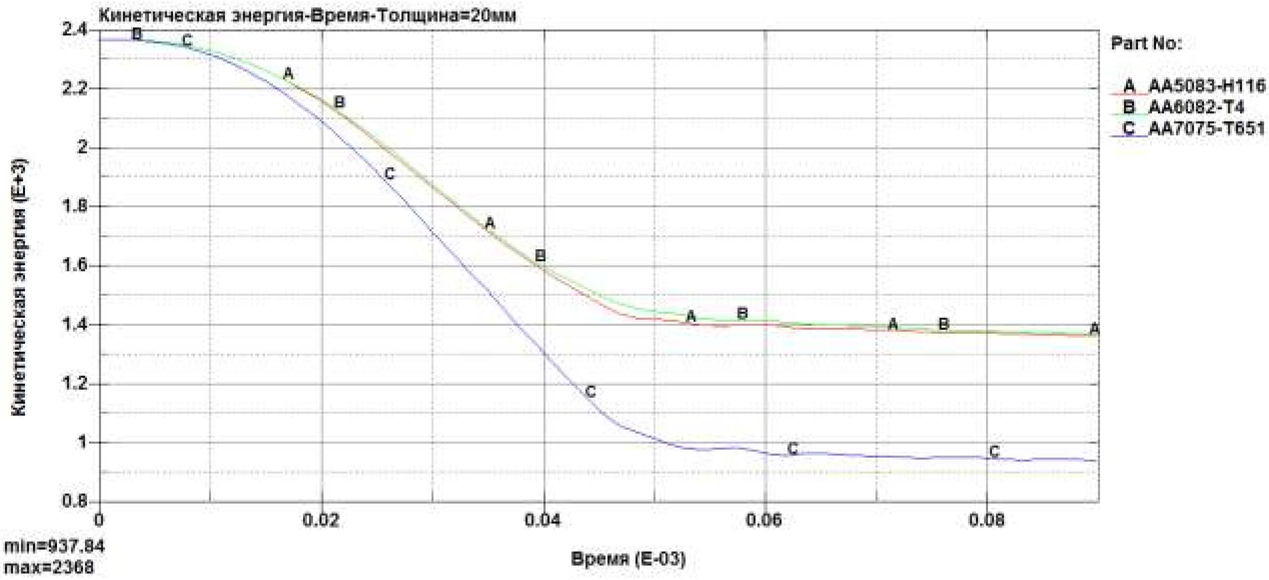

Рис.8. Диссипация кинетической энергии пули «Шар НАТО»

Рис.9. Процесс проникания пули «Шар НАТО»

При толщине пластин 30 мм для каждого типа алюминиевых сплавов результаты представлены на рис. 10 - 12.

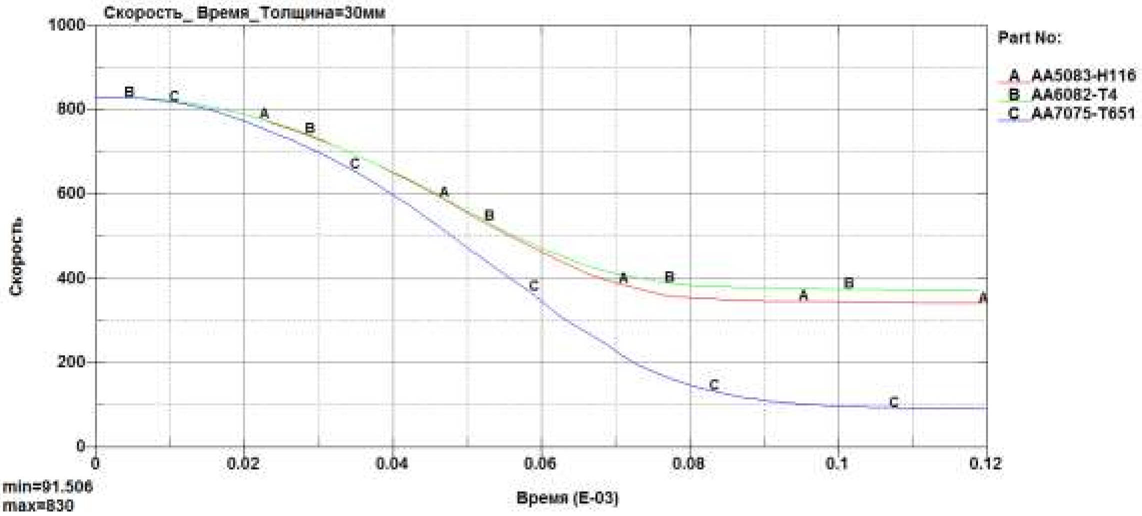

Рис.10. Остаточная скорость пули «Шар НАТО»

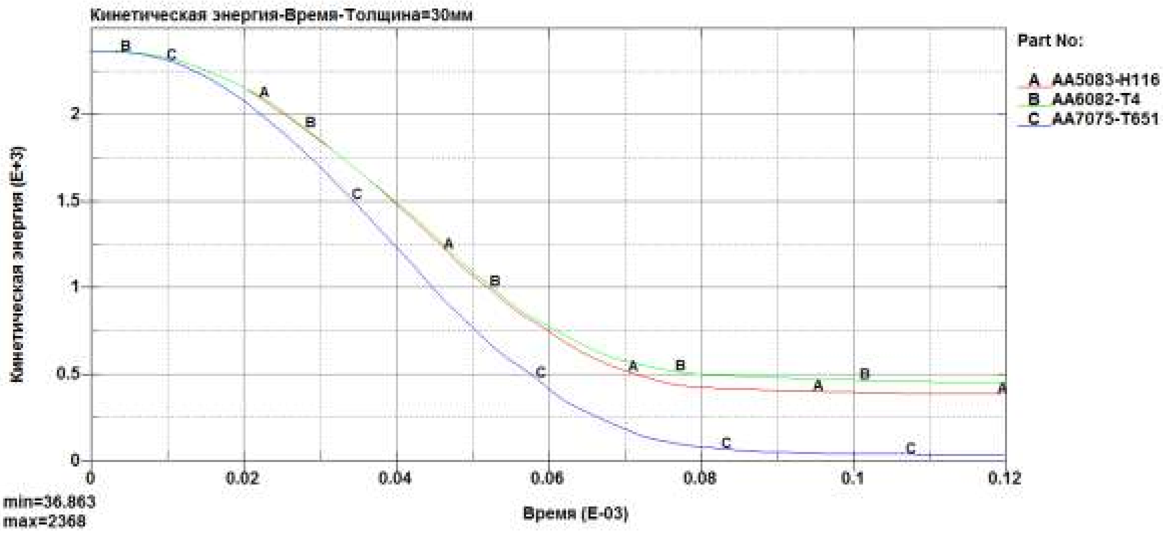

Рис.11. Диссипация кинетической энергии пули «Шар НАТО»

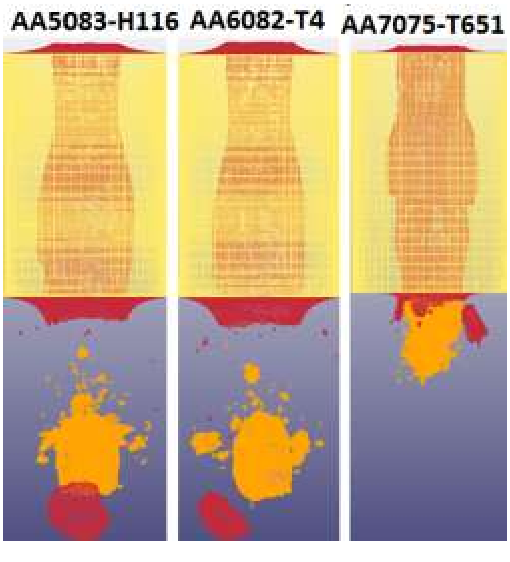

Рис.12. Процесс проникания пули «Шар НАТО»

Второй вариант: пуля «АРМ2»

При проникании пули со стальным сердечником, разрушения материала пулей почти не происходит. Таким образом, изменение массы сердечника очень мала или вообще отсутствует, поэтому, диссипация кинетической энергии зависит в основном от изменения скорости пули при процессе проникания.

При толщине пластин 10 мм для 3-х типов алюминиевых сплавов результаты показаны на рис. 13 - 15.

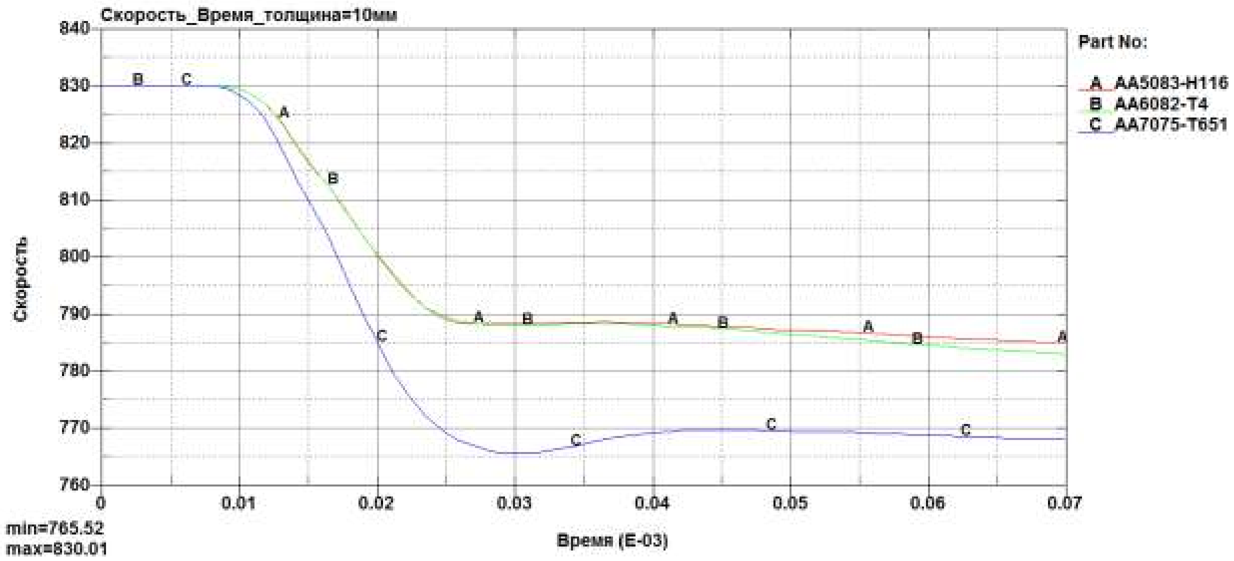

Рис.13. Остаточная скорость пули «АРМ2»

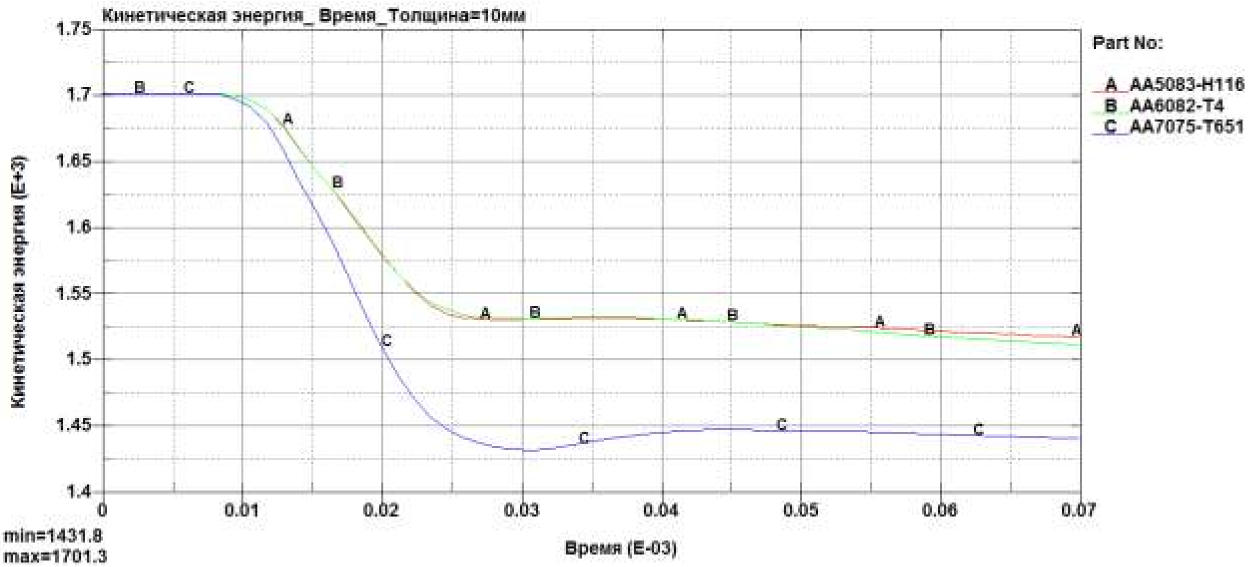

Рис.14. Диссипация кинетической энергии пули «АРМ2»

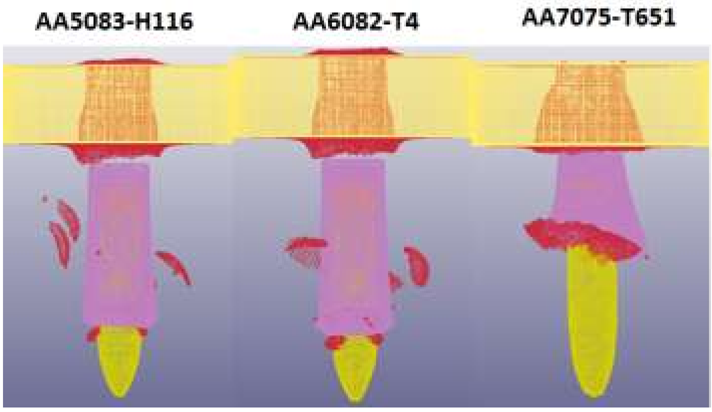

Рис.15. Процесс проникания пули «АРМ2»

При толщине пластины 20 мм для каждого типа алюминиевых сплавов результаты решений представлены на рис. 16 - 18.

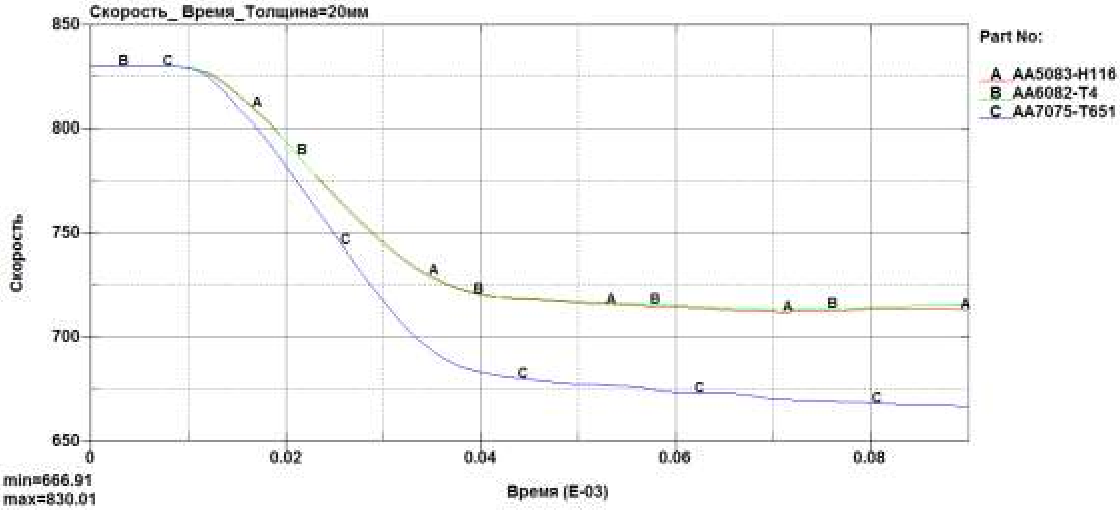

Рис.16. Остаточная скорость пули «АРМ2»

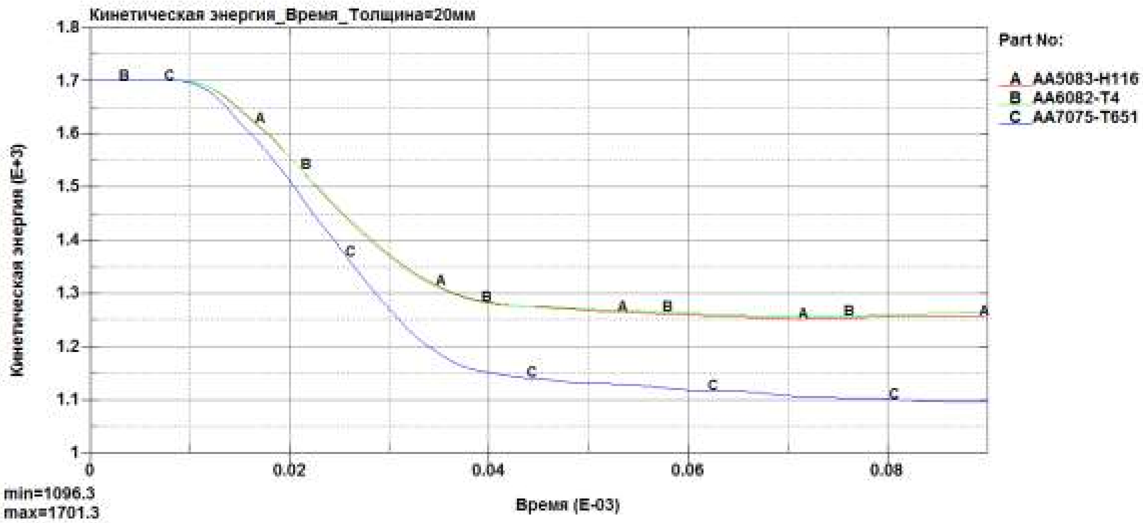

Рис.17. Диссипация кинетической энергии пули «АРМ2»

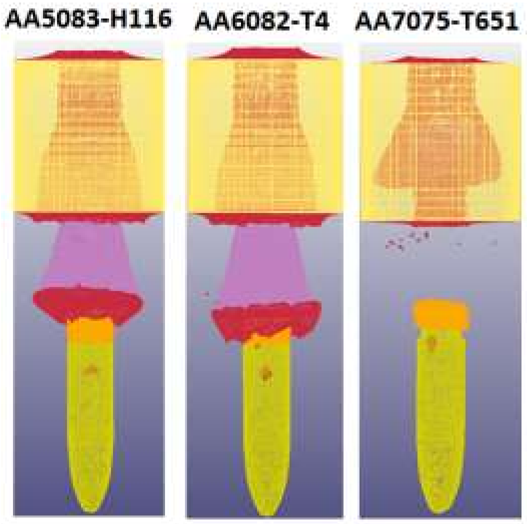

Рис.18. Процесс проникания пули «АРМ2»

При толщине 30 мм - на рис. 19 - 21.

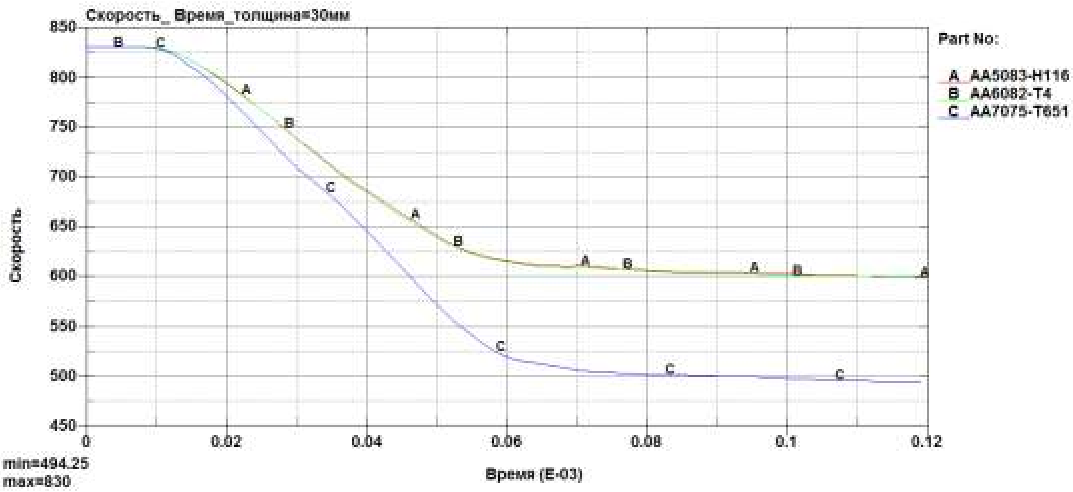

Рис.19. Остаточная скорость пули «АРМ2»

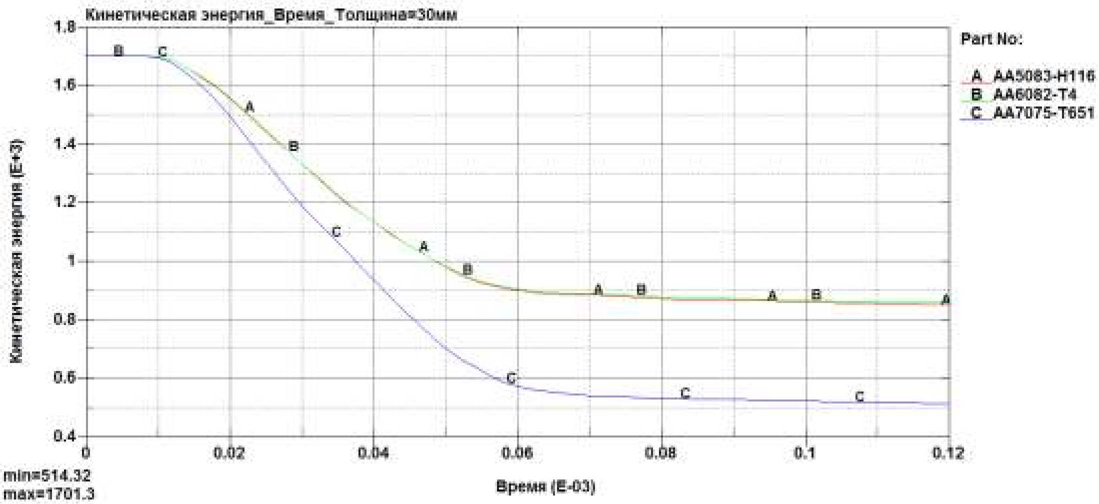

Рис.20. Диссипация кинетической энергии пули «АРМ2»

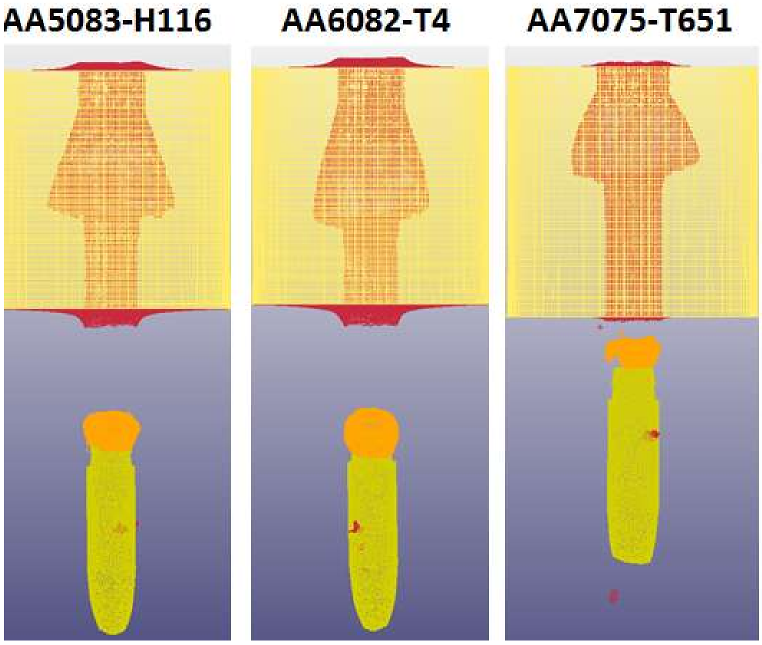

Рис.21. Процесс проникания пули «APM2»

Следует отметить, что в пластинах с толщиной 10 мм остаточные скорости пули «Шар НАТО» в этих алюминиевых сплавах близки друг к другу, в то время как при использовании пули «APM2» имеется небольшая разница в значениях. Причем, сплав AA7075-T651 показывает большую устойчивость к прониканию, чем AA6082-T4 и AA5083-H116, при остаточных скоростях близких друг к другу.

Отмечаем потерю 89% от скорости пули «Шар НАТО» в пенетрации пластины толщиной 30 мм из алюминиевого сплава AA7075-T651, 55 % в пенетрации AA6082-T4 и 59 % в пенетрации AA5083-H116. С другой стороны, скорость пули «APM2» снизилась на 40.5 % от её значения в пенетрации пластины толщиной 30 мм из алюминиевого сплава AA7075-T651, на 27.8 % в пенетрации AA6082-T4 и на 27.9 % в пенетрации AA5083-H116. На рис. 22 показана зависимость между толщинами алюминиевых сплавов и остаточной скоростью пули «Шар НАТО» и «APM2».

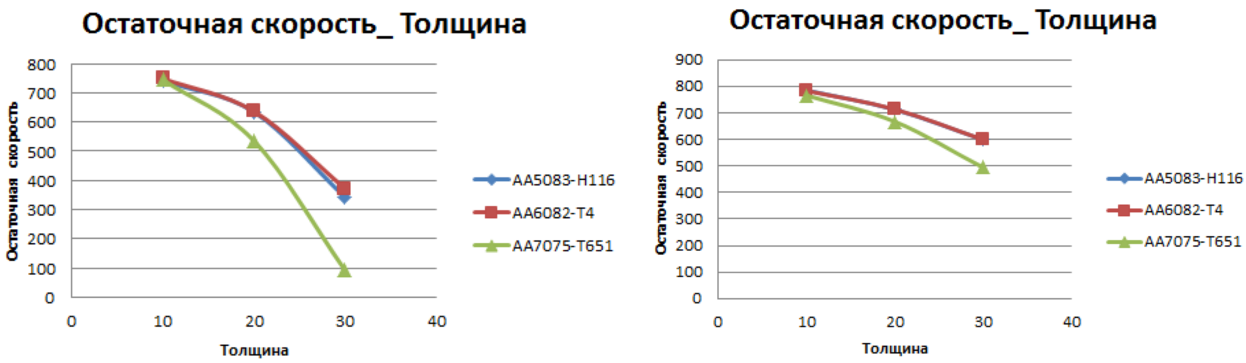

Рис.22. Зависимость между толщинами алюминиевых сплавов и остаточной скоростью пули «Шар НАТО» (слева) и «APM2» (справа)

Зависимость между толщинами алюминиевых сплавов и остаточной кинетической энергии пули «Шар НАТО» и «АРМ2» приведена на рис.23.

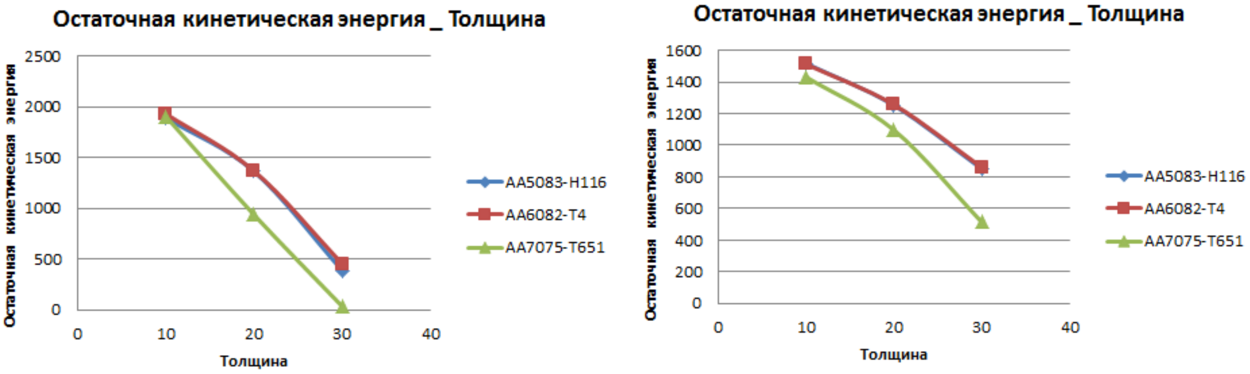

Рис.23. Зависимость между толщинами алюминиевых сплавов и остаточной кинетической энергии пули «Шар НАТО» (слева) и «АРМ2» (справа)

Отмечаем, что максимальное количество кинетической энергии рассеивается в AA7075-T651 при случае пули «Шар НАТО», уменьшение кинетической энергии составляет около 98.5 % при толщине пластины 30 мм.

На рис.24 показан механизм разрушения пластины при проникании пули. Мы можем отметить, что это поведение отличается в каждом конкретном случае. В дополнении к этому при более грубой сетке КЭ (второй и третий варианты: Δ = 0,5 мм и Δ = 1,0 мм) мы получили значение остаточной скорости с большой погрешностью, что дает представление о границах применимости этих КЭМ.

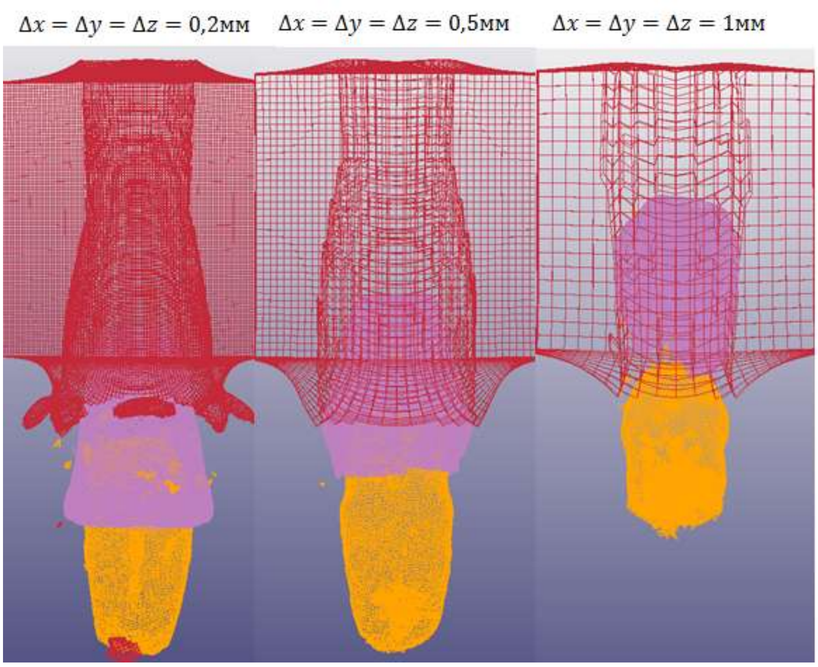

Рис.24. Картина проникания пули и разрушения пластины для трёх КЭМ с различными размерами КЭ

Заключение

В работе смоделирован и исследован процесс проникания пуль 7,62 мм «Шар НАТО» и 7,62 мм «АРМ2» в пластины из алюминиевых сплавов трех видов, а именно АА5083-Н116, АА6082-Т4, и АА7075-Т6 с тремя различными толщинами 10 мм, 20 мм, 30 мм. Модифицированный метод Джонсона-Кука и критерий разрушения Кокрофта-Латама были " настроены" на основе результатов испытаний и численных расчетов, после этого использованы при моделировании трехмерными нелинейными КЭ. Полученные нами результаты показывают влияние параметров материала E, A, B, n, m,W_{cr} на зависимость между пулей и пластинкой. Отметим также, что при малых толщинах алюминиевых сплавов параметры материалов слабо влияют на остаточные скорости пули «Шар НАТО», и несколько больше в случае пули «АРМ2». Механизмы разрушения, полученные расчетным путем, адекватны экспериментальным.

Следует также отметить, что точность результатов зависит главным образом от размера КЭ. Когда число элементов больше (и их размер соответственно меньше), точность результатов будет выше, но увеличится время решения. С учетом этого, в статье обоснованно предложен размер КЭ равный 0,2 мм, который является рациональным.

Выводы по работе

1. Остаточные скорости пуль при малых толщинах разных алюминиевых сплавов (до 10 мм) имеют близкие значения при проникании пуль «Шар НАТО» (для «АРМ2» разница несколько больше).
2. Механизмы разрушения, полученные расчетным путем, адекватны экспериментальным.
3. Сопротивление алюминиевого сплава к прониканию будет выше, если температуры плавления материалов осколков или пули ниже или близки к температуре плавления алюминиевых сплав, в то время как сопротивление будет меньше для осколков или пули из стали или другого материала с температурой плавления большей, чем у стали.
4. Рекомендуем использовать КЭ с размером не более 0.2 мм для получения высокоточных результатов, адекватных результатам экспериментов. Применение КЭ размером около 0,5 мм целесообразно использовать для предварительных расчетов, поскольку получаемое поведение разрушения схоже с экспериментальным, однако численные значения (остаточная скорость пули) существенно отличаются от экспериментальных. Применение КЭ с размерами около 1мм не рекомендуется.

Список литературы

1. Børvik T., Olovsson L., Dey S., 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. Jorgensen K.C., Swan V. Modeling of armour-piercing projectile perforation of thick aluminium plates // 13th Intern. LS-DYNA Users Conf. 2014 (Dearborn, Michigan, USA, June 8-10 2014): Conf. papers. Livermore: LSTC, 2014. 15 p.
3. Dowling N.E. Mechanical behaviour of materials. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 571 p.
4. Børvik T., Dey S., Clausen A.H.. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles // Intern. J. of Impact Engineering. 2009. Vol. 36. Iss. 7. Pp. 948–964. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003
5. Børvik T., M.J. Forrestal M.J., Warren T. Perforation of 5083-H116 aluminum armor plates with ogive-nose rods and 7.62mm APM2 bullets // Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50. Iss. 7. Pp. 969-978. DOI: 10.1007/s11340-009-9262-5
6. 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
7. Clausen A.H., Børvik T., Hopperstad O.S., Benallal A. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083–H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality // Materials Science and Engineering. Ser. A. 2004. Vol. 264. Iss. 1-2. Pp. 260-272. DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.027
8. Mohotti D., 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
9. Fagerholt E., Grytten F., Gihleengen B.E., Langseth M., Børvik T. Continuous out-of-plane deformation measurements of AA5083-H116 plates subjected to low-velocity impact loading // Intern. J. of Mechanical Sciences. 2010. Vol. 52. Iss. 5. Pp. 689-705. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.013
10. LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol.1. Livermore: LSTC, 2016.
11. Børvik T. Modelling of light-weight protection // Microstructural effects on damage, fracture and crashworthiness in high performance automotive materials: IAMI CANMET Workshop (Hamilton, Ontario, Canada, May10-11, 2011). Tronheim: NTNU, 2011.
12. Шаш Н., Зузов В. Н. Влияние параметров алюминиевых сплавов на сопротивление прониканию пуль 7.62 «Шар НАТО» и «APM2» // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 11. С. 15–27. DOI: 10.7463/1116.0850281

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

Science and Education of the Bauman MSTU, 2017, no. 01, pp. 1–19.

DOI: **10.7463/0117.0000922**

Received: 08.12.2016
Revised: 22.12.2016

Modified Johnson–Cook Model-based Numerical Simulation of Small Arms Bullets Penetration in the Aluminum Alloy Plates

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

[*]zuzov@bmstu.ru

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

Keywords: armour, aluminium alloys, bullet, modified Johnson-Cook, Cockcroft-Latham criterion, LS-DYNA, finite element model

In this paper, we simulated and studied the penetration process of 7,62 x 63 mm bullets "NATO Ball" (with a soft lead core) and 7.62 x 63 mm ones «APM2» (with hard steel core) in three kinds of aluminum plates, namely AA5083- H116, AA6082-T4, and AA7075-T6 with three different thicknesses of 10 mm, 20 mm, and 30 mm. The impact velocity was 830 m / s in all tests. Based on the test results and numerical calculations, all plates and a bullet were modeled as the deformable ones with modified constitutive Johnson-Cook relationship and Cockcroft-Latham fracture criterion. Then they were used in modeling by three-dimensional nonlinear finite element in Ansys Ls-Dyna package. The influence of the finite element size in the finite element model on the length and results of calculations has been investigated as well.

The main calculation results, we have received, include the residual bullet velocity and the residual kinetic energy of the bullet after drilling a hole in the plate and plate failure mechanism for each type and thickness of the plate with two types of bullets. We have noticed that the residual velocities of the bullets for small thicknesses of aluminum alloys (up to 10 mm) have relatively equal values upon penetration of the bullets "NATO Ball" and «APM2» (a bit more), as well as the calculation-obtained failure mechanisms are adequate to experimental. In addition, resistance of AA7075-T651 aluminum alloy to penetration is higher than that of AA5083-H116 and AA6082-T4 ones.

It should also be noted that the accuracy of the results depends mainly on the size of the grid elements. The more is the number of elements, the higher is the accuracy of the results, but the longer is the solution time. Therefore, we advice to use the finite element size of 0.2 mm, at most, to obtain the highly accurate results that are adequate to the experimental results.

References

1. Børvik T., Olovsson L., Dey S., 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. Jorgensen K.C., Swan V. Modeling of armour-piercing projectile perforation of thick aluminium plates. *13th Intern. LS-DYNA Users Conf. 2014* (Dearborn, Michigan, USA, June 8-10, 2014): Conf. papers. Livermore: LSTC, 2014. 15 p.
3. Dowling N.E. Mechanical behaviour of materials. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 571 p.
4. Børvik T., Dey S., Clausen A.H.. Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *Intern. J. of Impact Engineering*, 2009, vol. 36, iss. 7, pp. 948–964. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003
5. Børvik T., M.J. Forrestal M.J., Warren T. Perforation of 5083-H116 aluminum armor plates with ogive-nose rods and 7.62mm APM2 bullets. *Experimental Mechanics,* 2010, vol. 50, iss. 7, pp. 969-978. DOI: 10.1007/s11340-009-9262-5
6. 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
7. Clausen A.H., Børvik T., Hopperstad O.S., Benallal A. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083–H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality. *Materials Science and Engineering. Ser. A.,* 2004, vol. 264, iss. 1-2, pp. 260-272. DOI: 10.1016/j.msea.2003.08.027
8. Mohotti D., 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
9. Fagerholt E., Grytten F., Gihleengen B.E., Langseth M., Børvik T. Continuous out-of-plane deformation measurements of AA5083-H116 plates subjected to low-velocity impact loading. *Intern. J. of Mechanical Sciences,* 2010, vol. 52, iss. 5, pp. 689-705. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.013
10. LS-DYNA Keyword User’s Manual. Vol.1. Livermore: LSTC, 2016.
11. Børvik T. Modelling of light-weight protection. *Microstructural effects on damage, fracture and crashworthiness in high performance automotive materials: IAMI CANMET Workshop* (Hamilton, Ontario, Canada, 10-11 May 2011). Tronheim: NTNU, 2011.
12. Zuzov V.N., Shash N. Impact of aluminium alloy parameters on penetration resistance of the bullets 7.62 “Ball NATO” and “ARM2”. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E.Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2016, no. 11, pp.15-27. DOI: 10.7463/1116.0850281