

Сравнительное изучение защитающей способности элементов динамической защиты

© И.Ф. Кобылкин, А.А. Горбатенко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Выполнено численное моделирование процесса взаимодействия кумулятивных струй (КС) и элементов динамической защиты (ЭДЗ) с различными материалами. Показано, что для взрывной динамической защиты при равных массах взрывчатых веществ (ВВ) и пластин-обкладок небольшим преимуществом обладают ЭДЗ с керамическими обкладками. Их защитающая способность, выраженная в долях глубины пробития L_0 преграды из броневой стали, составляет $0,95L_0$, а для ЭДЗ со стальными обкладками — $0,93L_0$. Наименьшей защитающей способностью обладает ЭДЗ с инертным наполнителем. В результате численного моделирования получено значение этого параметра $0,87L_0$.

Ключевые слова: кумулятивная струя, взрывная и невзрывная динамическая защита, инертный наполнитель, стальные и керамические пластины-обкладки.

Введение. Необходимость придания легкобронированной технике противокумулятивной стойкости на уровне 400...500 мм гомогенной брони не оставляет альтернатив использованию для этого динамической защиты (ДЗ). Так применительно к объектам бронетехники называют устройства защиты от действия противотанковых средств поражения, в которых осуществляется дополнительное воздействие на проникающие в защищаемую преграду кумулятивные струи или сердечники бронебойных подкалиберных снарядов (БПС) смещающимися элементами — пластинами или плитами, входящими в состав устройства ДЗ [1, 2].

В наиболее распространенных устройствах взрывной ДЗ ускорение смещающихся элементов происходит при взрыве специальных зарядов ВВ в виде тонких слоев, размещаемых между ускоряемыми пластинами или плитами. Важной особенностью функционирования ДЗ является возбуждение взрыва заряда ВВ непосредственно при воздействии на него КС или БПС или порождаемых при их проникании ударных волн и осколочных потоков.

Одной из проблем, возникающих при использовании взрывной ДЗ для защиты бронетехники от кумулятивных средств поражения, является образование при ее срабатывании высокоскоростных фрагментов, представляющих большую опасность для пехоты и техники, окружающих защищаемый объект, а также интенсивные ударное и взрывное воздействия на защищаемый объект. Кроме того, взрывная ДЗ

вследствие особенностей ее функционирования допускает проникание в защищаемую броню так называемых лидеров — высокоскоростных головных участков КС, представляющих серьезную угрозу для легкобронированной техники [1]. Именно эти обстоятельства в значительной степени затрудняют использование ДЗ для защиты легкобронированной техники в том виде, в котором она используется для защиты тяжелой бронетехники. В связи с этим в последнее десятилетие появилось достаточное количество разработок ДЗ облегченного типа, позволяющих минимизировать перечисленные недостатки. Можно выделить два перспективных направления решения этой проблемы.

Первое направление связано с использованием невзрывной ДЗ на основе плоских элементов, в которых между металлическими пластинами вместо ВВ размещается слой инертного или локально реагирующего с малым энерговыделением материала [1, 3]. Поскольку функционирование такой ДЗ осуществляется в основном благодаря кинетической энергии части КС, поглощенной при проникании через элементы ДЗ (ЭДЗ), она практически не обладает побочным действием.

Второе направление снижения опасности ЭДЗ основано на использовании в качестве обкладок ЭДЗ пластин из материалов, разрушающихся при взрыве заряда ВВ на мелкие частицы, не обладающие существенным ударно-проникающим действием уже на небольшом расстоянии от устройства ДЗ [4, 5]. Известно много хрупких (стекло, керамика) и прессованных из порошков материалов, которые при взрыве разрушаются подобным образом. Воздействие дисперсного потока на поверхность защищаемого объекта сопровождается уменьшением амплитуды импульса нагрузки и одновременным увеличением ее длительности.

Чтобы обосновать возможность использования рассмотренных типов ДЗ для противокумулятивной защиты легкобронированной техники, необходимо сравнить их защищающую способность с аналогичным параметром традиционной ДЗ, где взрывные ЭДЗ имеют металлические пластины. Для решения этой задачи в настоящей статье использовано численное моделирование.

Расчет характеристик КС модельного кумулятивного заряда. В качестве модельного (тестового) кумулятивного заряда в настоящей статье использован заряд, эквивалентный кумулятивной боевой части широко распространенной противотанковой гранаты ПГ-7Л [6].

Расчет характеристик КС модельного кумулятивного заряда проводили в двумерной постановке в пакете программ ANSYS Autodyn. Материал кумулятивной облицовки — медь (уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена [2]). Прочность материала

облицовки не учитывали. Заряд ВВ на основе октогена плотностью $\rho_0 = 1783 \text{ кг/м}^3$ имел скорость детонации $D = 8730 \text{ м/с}$. Уравнение состояния продуктов детонации брали в форме Джонса — Уилкинса — Ли (JWL) [2]. На рис. 1 представлены стадии развития КС.

В результате расчета получены следующие параметры КС: скорость и диаметр головной части КС соответственно $10\,000 \text{ м/с}$ и 2 мм , хвостовой части — 827 м/с и 8 мм . Вид КС и распределение скорости по ее длине показано на рис. 2. Глубина бронепробития L_0 такой КС составила около 500 мм .

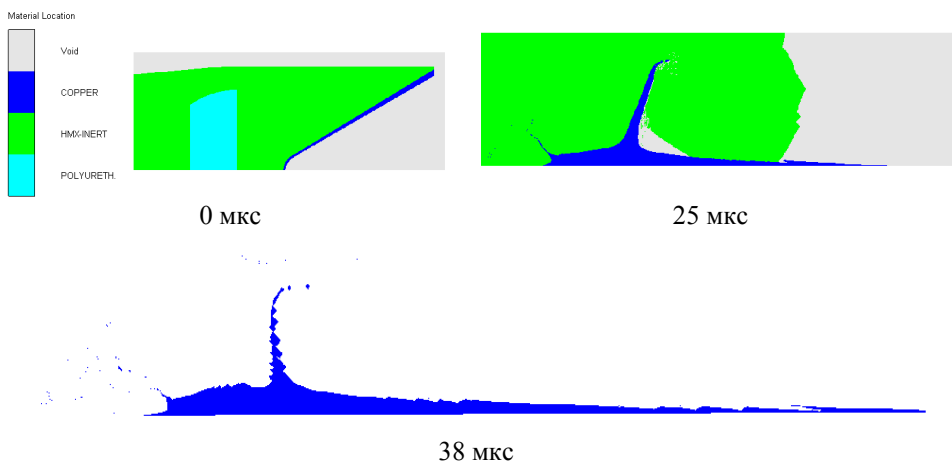


Рис. 1. Формирование КС

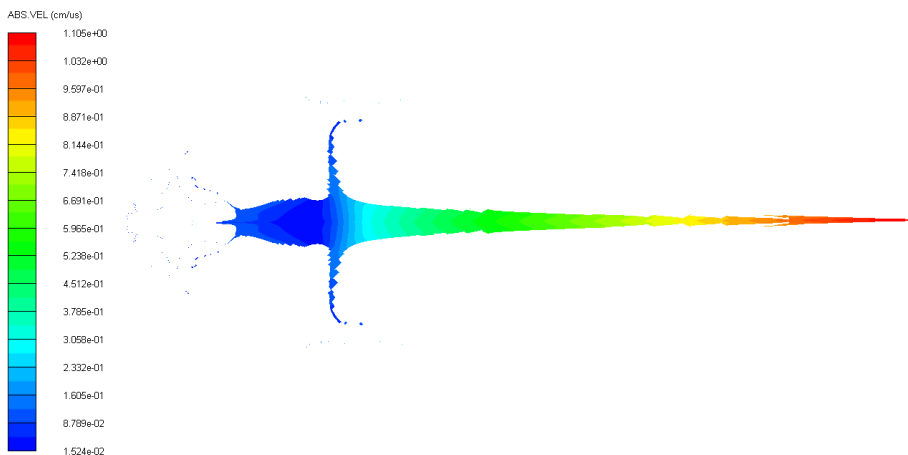


Рис. 2. Распределение скорости по длине КС тестового кумулятивного заряда

Численное моделирование взаимодействия КС с ЭДЗ с инертным наполнителем. Для изучения механизмов взаимодействия КС ЭДЗ с инертным наполнителем были проведены численные расчеты в трехмерной постановке в пакете программ ANSYS Autodyn. Расчеты проводили для следующих материалов наполнителя: оргстекло, поликарбонат, вода, парафин и фторопласт. Угол наклона ЭДЗ к направлению воздействия КС составлял 25, 30 и 45°. При проникании через такой ЭДЗ в его наполнителе формируется расходящаяся ударная волна. Ускорение пластин происходит под действием давления за фронтом ударной волны, из-за сильного затухания которой оно локализуется в области воздействия КС. Тем не менее, возникшее движение перемещает на траекторию КС непробитые участки пластины, что приводит к повреждению части КС и снижению ее проникающей способности (рис. 3).

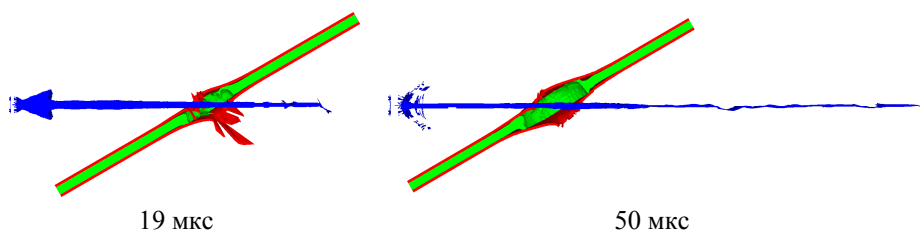


Рис. 3. Взаимодействие КС с невзрывным ЭДЗ, снаряженным оргстеклом (толщина обкладок 2 мм, толщина слоя оргстекла 6 мм)

В результате проведенных расчетов установлено, что основным параметром, определяющим скорость разгона пластин и, следовательно, защищающую способность ДЗ, является акустический импеданс материала наполнителя. Вследствие локального ускорения пластин невзрывная ДЗ обладает умеренной эффективностью по сравнению с взрывной ДЗ. Выполненные расчеты и эксперименты, результаты которых приведены в [1, 3], показывают, что защищающая способность одиночных элементов невзрывной ДЗ колеблется в диапазоне $(0,50 \dots 0,65)L_0$.

Один ЭДЗ длиной 250 мм не может полностью поглотить КС кумулятивного заряда, принятого в качестве тестового, поэтому исследовали защищающую способность двух расположенных параллельно одинаковых ЭДЗ (рис. 4). Расчет взаимодействия КС с двумя параллельными ЭДЗ проводился в трехмерной постановке. ЭДЗ располагались под углом в 60° от нормали, расстояние между ЭДЗ — 40 мм. На рис. 5 представлены результаты расчета проникания КС в ЭДЗ. Защищающая способность такой ДЗ составила 0,87L₀.

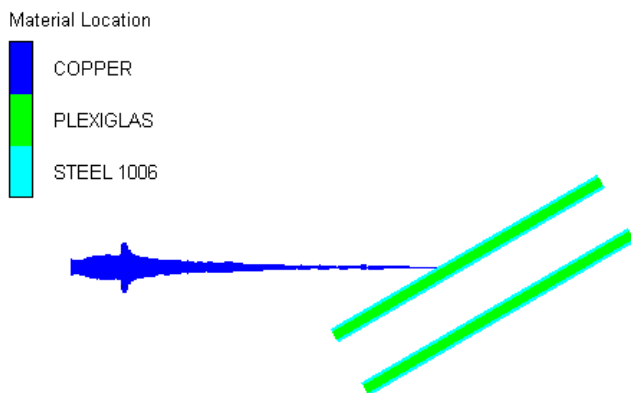


Рис. 4. Постановка задачи проникания КС через два параллельных невзрывных ЭДЗ

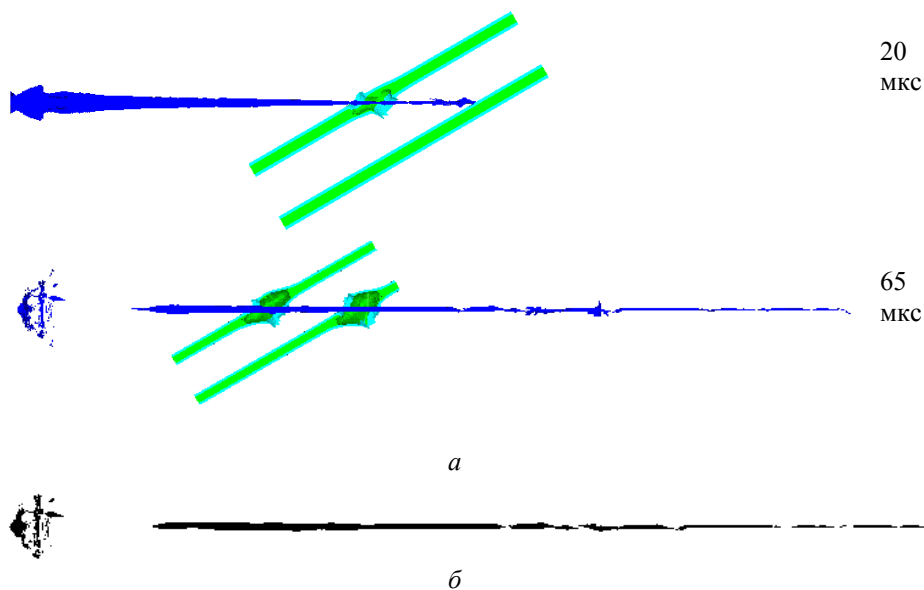


Рис. 5. Результаты расчета проникания КС в ЭДЗ с инертным наполнителем: *а* — взаимодействие КС с ЭДЗ спустя 20 и 65 мкс после начала; *б* — вид КС через 147 мкс после начала взаимодействия с ЭДЗ

Численное моделирование взаимодействия КС с взрывным ЭДЗ с керамическими и стальными обкладками. Второе направление снижения опасности ЭДЗ основано на использовании в качестве обкладок ЭДЗ пластин из материалов, разрушающихся при взрыве заряда ВВ на мелкие частицы, не обладающие существенным ударно-проникающим действием на небольшом расстоянии от устройства ДЗ. Для сравнительного изучения механики взаимодействия КС с пластинами из различных материалов в пакете

программ ANSYS Autodyn было выполнено трехмерное численное моделирование процессов взаимодействия КС с ЭДЗ, снаряженными ВВ с керамическими и стальными пластинами.

Проведенные в работах [4, 5] эксперименты показали достаточно высокую эффективность ЭДЗ с обкладками из керамики. Рентгенограммы проникания КС через ЭДЗ с керамическими обкладками приведены на рис. 6 [4].

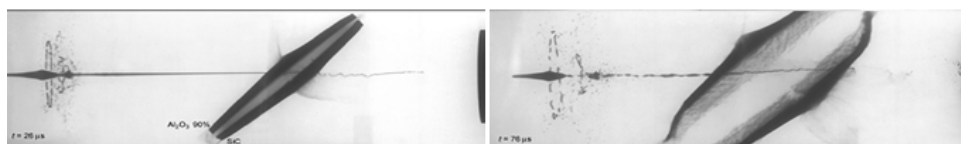


Рис. 6. Рентгенограммы проникания КС через ЭДЗ с керамическими обкладками

Получено, что ЭДЗ из керамики Al_2O_3 имеет защищающую способность, на 42 % большую, чем ЭДЗ со стальными обкладками, при равных массах ВВ и пластин элемента. Этот эффект может быть объяснен большей толщиной керамических пластин и большей прочностью на сжатие керамики по сравнению со сталью.

Для сравнительного изучения механики взаимодействия керамических и стальных пластин с КС было выполнено численное моделирование процессов взаимодействия КС с различными ЭДЗ. Расчет взаимодействия КС с двумя параллельными ЭДЗ проводили в трехмерной постановке (рис. 7). Располагали ЭДЗ под углом 60° к нормали, расстояние между ЭДЗ — 40 мм. Материал обкладок ЭДЗ — керамика Al_2O_3 .

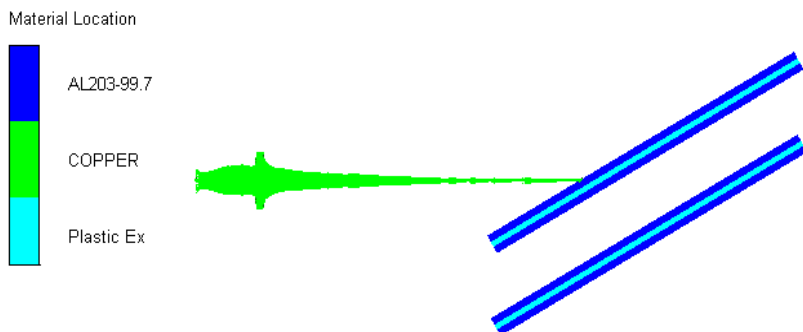


Рис. 7. Постановка задачи проникания КС через два параллельных ЭДЗ с керамическими обкладками

В настоящее время для описания динамического деформирования хрупких материалов широко используют модель Джонсона — Холмквиста (Johnson — Holmquist) [7]. Эта модель интегрирована в программный комплекс ANSYS Autodyn. В модели Джонсона — Холмквиста предел прочности хрупкого материала σ в процессе его разрушения изменяется от предела прочности исходного неповрежденного материала σ_0 до предела прочности полностью разрушенного (измельченного) материала σ_p . Соответствующее уравнение имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p),$$

где D — поврежденность ($0 \leq D \leq 1$).

Поврежденность определяется как относительная накопленная пластическая деформация: $D = \sum \Delta \varepsilon_{\text{пл}} / \varepsilon_{\text{пл}}^p$, где $\Delta \varepsilon_{\text{пл}}$ — элементарная пластическая деформация (например, за один шаг интегрирования); $\varepsilon_{\text{пл}}^p$ — условная предельная пластическая деформация при постоянном давлении p , при которой хрупкий материал разрушается. При вычислении $\varepsilon_{\text{пл}}^p$ учитывали, что, во-первых, действие сжимающих напряжений приводит к некоторому упрочнению хрупких материалов, и, во-вторых, что хрупкие материалы могут разрушаться под действием не только растягивающих, но и сжимающих напряжений:

$$\varepsilon_{\text{пл}}^p = D_1(P + T_p)^{D_2},$$

где $P = p/Y$ — безразмерное давление; Y — предел упругости Гюгонио (предел упругости на ударной адиабате материала); $T_p = T_p^*/Y$ — безразмерное максимальное напряжение всестороннего растяжения, которое материал может выдержать без разрушения; T_p^* — максимальное напряжение на растяжение при гидростатическом воздействии; D_1, D_2 — постоянные.

Пределы прочности неповрежденного и полностью разрушенного материалов зависят от текущих значений давления и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$:

$$\sigma_0 = A(P + T_p)^N \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right);$$

$$\sigma_p = BP^M \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right).$$

Здесь A, N, C, B, M — постоянные; $\dot{\varepsilon}_0 = 1,0 \text{ с}^{-1}$.

Предел прочности разрушенной керамики ограничен сверху значением $\sigma_{p\max} = gY$, где g — постоянная.

Гидростатическое давление определяют по уравнению

$$p = K_1 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right) + K_2 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^2 + K_3 \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^3 + \Delta p,$$

в котором K_1, K_2, K_3 — постоянные. После того как материал начинает разрушаться ($D > 0$), давление в материале увеличивается на Δp вследствие превращения высвобождающейся упругой энергии в потенциальную энергию сжатия. При $D = 1$ вся упругая энергия из-за потери материалом сдвиговой прочности превращается в потенциальную энергию всестороннего сжатия.

Значения постоянных в модели Джонсона — Холмквиста для корундовой керамики Al_2O_3 , карбидокремниевой керамики SiC и натрийсиликатного стекла [6.19] приведены в таблице.

Значения постоянных в модели Джонсона — Холмквиста

Постоянная	Тип керамики; ρ_0 , г/см ³		
	Al_2O_3 ; 3,91	SiC ; 3,16	Стекло; 2,53
Модуль Юнга, ГПа	379	423	—
Модуль сдвига, ГПа	153	183	30,4
Y , ГПа	3,76	5,90	2,92
T , ГПа	0,16	0,37	0,15
A	0,98	0,96	0,93
B	0,35	0,35	0,088
C	0	0	0,003
M	1,00	1,00	0,35
N	0,39	0,65	0,77
D_1	0,0070	0,0048	0,053
D_2	1,24	0,48	0,85
K_1 , ГПа	—	—	45,4
K_2 , ГПа	—	—	-138,0
K_3 , ГПа	—	—	290,0

В качестве снаряжения ЭДЗ использовали пластичное ВВ — ПВВ-12М. Было выбрано уравнение состояния с кинетикой взрывного превращения Ли — Тарвера [2]. Число ячеек расчетной сетки ячеек на 1 мм³ составляло 2×2×2.

На рис. 8 представлены результаты расчета проникания КС в ЭДЗ.

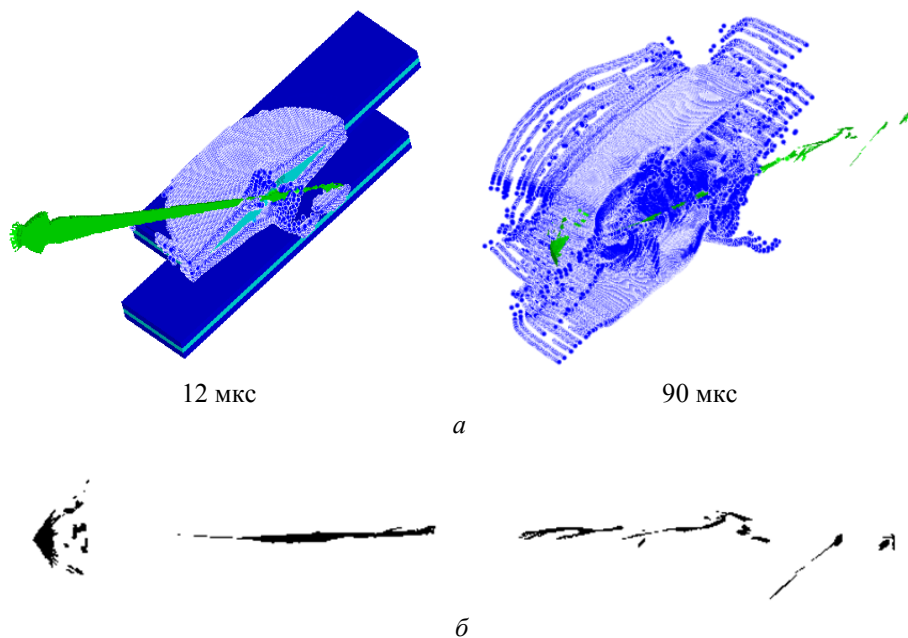


Рис. 8. Результаты расчета проникания КС в ЭДЗ с керамическими обкладками: *а* — взаимодействие КС с ЭДЗ спустя 12 и 90 мкс после начала; *б* — вид КС через 147 мкс после начала взаимодействия с ЭДЗ

При взаимодействии КС с керамическими пластинами последние полностью разрушаются и образуют плотный поток осколков, который эффективно разрушает КС и в то же время слабо влияет на более удаленный защищаемый объект при соударении с ним. При численном моделировании после разрушения керамика остается сплошной, но ее плотность несколько уменьшается. Глубина конечного бронепробития составила 25 мм, защищающая способность ДЗ — $0,95L_0$.

Для сравнения защищающей способности ЭДЗ с разрушающимися обкладками и ЭДЗ со стальными обкладками в аналогичной постановке был проведен численный расчет взаимодействия той же КС с двумя параллельными ЭДЗ со стальными обкладками при равных массах обкладок и ВВ. снаряжение ЭДЗ было тем же, что и в предыдущем расчете. Для описания деформирования стальных обкладок использовали уравнение состояния в форме Ми — Грюнайзена с моделью упрочнения и разрушения по Джонсону — Куку. Располагали ЭДЗ под углом 60° к нормали, расстояние между элементами составляло 40 мм.

Результаты расчета приведены на рис. 9. Остаточная глубина бронепробития при воздействии под углом 60° составила 37 мм, защищающая способность ДЗ оказалась несколько меньшей, чем у ЭДЗ с керамическими обкладками, — $0,93L_0$.

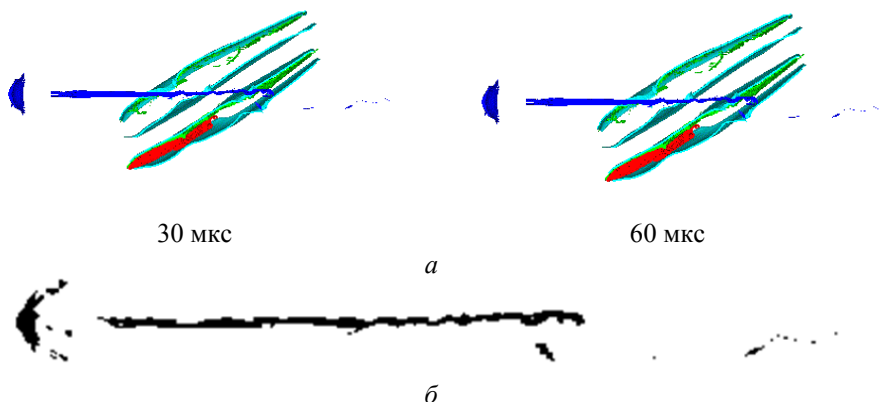


Рис. 9. Результаты расчета проникания КС в ЭДЗ с керамическими обкладками: *а* — взаимодействия КС с ЭДЗ спустя 30 и 60 мкс после начала; *б* — вид КС через 147 мкс после начала взаимодействия с ЭДЗ

Выводы. Результаты численного моделирования показали, что при равных массах ВВ и пластин-обкладок небольшим преимуществом обладают ЭДЗ с керамическими обкладками.

Увеличение защищающей способности ЭДЗ с керамическими обкладками связано в основном с большим пределом прочности керамики на сжатие. При пробитии КС пластин из упругопластичных материалов с небольшим пределом текучести (низкоуглеродистые стали) в них образуется отверстие, которое достаточно быстро расширяется до нескольких диаметров КС, что приводит к прониканию головного элемента КС (лидера [1]) без взаимодействия с пластинами ЭДЗ. При пробитии КС керамических пластин-обкладок образующееся отверстие расширяется в значительно меньшей степени, что позволяет пластинам взаимодействовать со струей сразу после детонации заряда ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Григорян В.А., Дорохов Н.С., Кобылкин И.Ф. и др. *Частные вопросы конечной баллистики*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 592 с.
- [2] Кобылкин И.Ф. и др. *Физика взрыва*: в 2 т. Л.П. Орленко, ред. 3-е изд. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002.
- [3] Григорян В.А., Дорохов Н.С., Кобылкин И.Ф., Бодров С.А., Жбанков Ю.П., Рототаев Д.А. Невзрывная противокумулятивная динамическая защита. *Оборонная техника*, 2002, № 1–2, с. 20–25.
- [4] Bianchi S., Kaufmann H., Koch A. Effect of Ceramics, Fibre Reinforced Plastics and Aluminium Used as Confinement Plates for Explosive Reactive Armors. *The 24th Int. Symp. on Ballistics*. New Orleans, USA, 2008, pp. 520–527.

- [5] Maiseless M., Bianchi S., Kaufmann H. etc. Non Metallic Reactive Armor. *The 27th Int. Symp. on Ballistics*. Freiburg, Germany, 2013, pp. 1745–1755.
- [6] *Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Боеприпасы и средства поражения*. Т. 12. Москва, Издательский дом Оружие и технологии, 2006, 847 с.
- [7] Holmquist T.J., Johnson G.R., Grady D.E. High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass. *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics*. Jerusalem, Israel, 1995, p. 15.

Статья поступила в редакцию 25.04.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Сравнительное изучение защищающей способности элементов динамической защиты. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 04. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1391.html>

Кобылкин Иван Федорович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, автор около 200 научных и научно-методических трудов, в том числе 11 монографий и учебников в области теории взрывчатых веществ, взрывных технологий, химической физики горения и взрыва, материалов и структур легкой бронезащиты, динамической защиты бронетехники. e-mail: kobylkin_ivan@mail.ru

Горбатенко Анастасия Анатольевна родилась в 1992 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2014 г. Аспирантка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: selenta92@mail.ru

Comparative study of the protection ability of reactive armor elements with reduced impact on defended object

© I.F. Kobylykin, A.A. Gorbatenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia

The article discusses the numerical simulation of interaction between shaped charge jet (SCJ) and explosive reactive armor (ERA) units containing different materials. Numerical simulation shows a small advantage of ERA with ceramic plates over other materials in case of equal mass of high explosive and plates. Protection ability value of such reactive armor is $0,95L_0$ and $0,93L_0$ (L_0 is the depth of penetration cavern in homogeneous steel armor) for ERA with steel plates. Extension of hole diameter for ceramic ERA plates is much smaller, thus ceramic ERA plates can interact with SCJ directly after ERA high explosive detonation. It is obtained by numerical simulation that value of protection ability for reactive armor with inert filler is the smallest ($0,87 L_0$).

Keywords: shaped charge jet, explosive reactive armor, non-explosive reactive armor, inert filler, steel and ceramic plates.

REFERENCES

- [1] Grigoryan V.A., Dorokhov N.S., Kobylykin I.F., et al. *Chastnye voprosy konechnoy ballistiki* [Particular issues of ultimate ballistics]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 592 p.
- [2] Kobylykin I.F., et al. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. In two vols. Orlenko L.P., ed. 3rd edition. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002.
- [3] Grigoryan V.A., Dorokhov N.S., Kobylykin I.F., Bodrov S.A., Zhbakov Yu.P., Pototayev D.A. *Oboronnyay tehnika – Defense Technology*, 2002, no. 1–2, pp. 20–25.
- [4] Bianchi S., Kaufmann H., Koch A. Effect of Ceramics, Fibre Reinforced Plastics and Aluminium Ysed as Confinement Plates for Explosive Reactive Armors. *The 24th Int. Symp. on Ballistics*. New Orleans, USA, 2008, pp. 520–527.
- [5] Maiseless M., Bianchi S., Kaufmann H. etc. Non Metallic Reactive Armor. *The 27th Int. Symp. on Ballistics*. Freiburg. Germany, 2013, pp. 1745–1755.
- [6] *Oruzhie i tekhnologii Rossii. Entsiklopedia. XXI vek. Boepripasy i sredstva porazheniya* [Russia's Arms and Technologies. Encyclopedia. XXI Century. Ordnance and Munitions]. Vol 12. Moscow, Oruzhie i tekhnologii Publ., 2006, 847 p.
- [7] Holmquist T.J., Johnson G.R., Grady D.E. High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass. *Proceedings of the Fifteenth International Symposium on Ballistics*. Jerusalem, Israel, 1995.

Kobylykin I.F. (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Dr. Sci. (Eng.), professor of the Department of High-Precision Airborne Devices at the Bauman Moscow State Technical University. The author of about 200 scientific works and methodical works, including 11 monographs and textbooks on the theory explosive, blasting technology, chemical physics of combustion and explosion, materials and structures of light armor, armor armored vehicles. e-mail: kobylykin_ivan@mail.ru

Gorbatenko A.A. (1992) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2014. Graduate student at the Department of High-Precision Airborne Devices at BMSTU. e-mail: selenta92@mail.ru