

Научная статья

Влияние биметаллической оболочки и вращения на взаимодействие ударника с металлокерамической полубесконечной преградой

П.А. Радченко^{1,2}, С.П. Батуев^{1,2}, А.В. Радченко^{1,2}

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Российская Федерация

Численно моделируется высокоскоростное взаимодействие ударника, состоящего из высокопрочного стального сердечника, свинцового наполнителя и оболочки из латуни, с металлокерамической и монолитной металлической преградой. Металлокерамическая преграда представляет собой двухслойную конструкцию, верхний слой которой изготовлен из карбида бора (B_4C), нижний – из алюминия, монолитная преграда полностью алюминиевая. Рассмотрены углы между продольной осью ударника и нормалью к преграде от 0 до 45 градусов. Изучается влияние биметаллической оболочки и вращения ударника вокруг своей продольной оси на его взаимодействие с преградой. Поведение металлических материалов и керамики B_4C описывается упругопластической средой. В качестве критерия разрушения металлических материалов выступает предельное значение интенсивности пластической деформации. Разрушение керамики оценивается на основе деформационного критерия с учетом ее различной прочности на сжатие и растяжение. Моделирование проводится в трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием авторского алгоритма и программного комплекса EFES 2.0, позволяющего учитывать фрагментацию взаимодействующих тел с образованием новых контактных и свободных поверхностей, эрозионное разрушение материалов. Адекватность математической модели и численного алгоритма подтверждается хорошим согласованием результатов как натуральных, так и вычислительных экспериментов. Численная методика дает возможность осуществлять параметрические исследования связи процесса взаимодействия с кинематическими, геометрическими и конструктивными факторами. Показано, что биметаллическая оболочка и вращение существенно сказываются на процессе взаимодействия ударника с металлокерамической преградой.

Ключевые слова: ударник, оболочка, сердечник, керамика, разрушение, численное моделирование, рикошет, глубина кратера

Получение: 20.09.2024 / *Публикация онлайн:* 10.04.2025

УДК 532.5

1. Введение

Процесс взаимодействия ударника с преградой и его результат зависят от многих факторов: физико-механических свойств материалов тел, скорости удара, геометрических параметров, конструктивных особенностей ударника и преграды. В настоящее время численное моделирование является одним из основных инструментов, позволяющих проводить широкие параметрические исследования и прогнозировать влияние различных факторов на этот высокоскоростной процесс. При этом эксперимент необходим для подтверждения адекватности используемых математических моделей и численных алгоритмов.

При выполнении опытов по изучению поведения материалов при высоких скоростях деформирования применяются ударники разных конструкций: безоболочечные, когда ударник представляет собой монолитное тело из одного материала, и оболочечные, когда ударник состоит из сердечника, заключенного в оболочку, образуемую одним или двумя слоями материала. Влиянию оболочки на взаимодействие ударника с преградами посвящен ряд экспериментальных исследований [1–6]. В [1] показано, что конструкция ударника (наличие оболочки, наполнителя) влияет на его баллистические характеристики и проникающую способность. Оценке роли оболочки в ударном процессе в зависимости от материалов сердечника, оболочки и преграды посвящены работы Crouch и др. [2], Hazell и др. [3], Forrestal и др. [4] и Roberts и др. [5]. Анализ результатов свидетельствует, что степень влияния оболочки на проникание обуславливается материалами взаимодействующих тел. Так, в [4] показано, что оболочка мало сказывается на проникании высокопрочного сердечника в алюминиевую преграду. Иная картина наблюдается, если ударник встречается с керамической преградой [2, 3, 5, 6], в этом случае роль оболочки существенна. В работе [2] установлено, что стальная оболочка ударника с сердечником из мягкой стали увеличивает проникающую способность ударника при пробитии преграды из карбида бора. При ударе о керамику сердечника без оболочки происходит его обширное эрозионное разрушение и, как следствие, потеря кинетической энергии.

Предполагается, что существуют два механизма, обеспечивающих увеличение проникающей способности оболочечного ударника: во-первых, оболочка снижает радиальный импульс сердечника в контактной области, что позволяет сохранить осевой импульс; во-вторых, оболочка повреждает керамику до ее соприкосновения с сердечником [7]. В работе [8] представлены результаты комплексного (экспериментального и численного) исследования проникания сердечника из карбида вольфрама без оболочки и в оболочке в алюминиевые и стальные преграды конечной толщины. Как показали эксперименты, остаточная скорость оболочечного ударника после перфорации преграды почти на 50% превышает остаточную скорость сердечника без оболочки. Таким образом, из анализа экспериментальных данных следует, что при численном моделировании для получения адекватных результатов и успешного прогнозирования физико-механических свойств ударяющихся тел в конструкциях ударника необходимо принимать во внимание и оболочки, и наполнители [9, 10]. Но следует отметить, что учет конструктивных особенностей существенно усложняет задачу. Поэтому иногда в работах, посвященных

численному моделированию высокоскоростного воздействия оболочечных ударников, наличием оболочки и наполнителя пренебрегают, рассматривают только взаимодействие сердечника [11] или считают, что ударник полностью состоит из материала сердечника [12].

Керамические материалы на основе карбида бора (B_4C) обладают высокими механическими характеристиками, прежде всего такими как твердость, износостойкость, высокие модули упругости. Относительно низкая плотность в сочетании с высокими механическими характеристиками обуславливают широкое использование этого материала в качестве элементов противоударных защитных конструкций [2–8, 10, 13]. Исследованию разнообразных свойств карбида бора в области высоких давлений, возникающих при ударных воздействиях, посвящено много работ [13–20]. Свойства керамики (B_4C) и ее поведение в ударных волнах и при высоких скоростях деформирования существенно зависит от технологии ее получения [15–20]. Например, при высоких давлениях в карбиде бора могут происходить фазовые переходы, что выражается в изломах на кривой ударной адиабаты [15, 16]. Изломы свидетельствуют о повышении (до 15 ГПа) предела текучести и уменьшении удельного объема при фазовом превращении в области давлений 40–50 ГПа, при этом точно определить давление фазового перехода ударно-сжатого карбида бора затруднительно в связи с большим разбросом экспериментальных данных, обусловленных способом изготовления образцов [16]. Особенностью карбида бора также является низкая прочность на растяжение.

Еще один фактор, влияние которого обсуждается в настоящей работе — вращение ударника. Для метания в баллистических экспериментах используются как нарезные стволы, при выходе из которых ударник приобретает поступательное движение и вращение вокруг своей продольной оси, так и гладкоствольные установки, не создающие вращения ударника. Иногда прибегают к обратной баллистике [2], осуществляют метание преграды, а ударник закреплен и неподвижен. В этом случае вращение ударника также отсутствует.

Как правило, при реализации вычислительных экспериментов вращением ударника пренебрегают. Отчасти это связано с предположением, что при взаимодействии вращающегося ударника основное влияние будет оказывать трение. Но эксперименты Джозефа Краффта по исследованию проникающей способности вращающихся и невращающихся ударников [19] выявили, что вклад трения незначителен: он не превышает 3–4% при низкоскоростном ударе и менее 1% при высокоскоростном. В дальнейшем, основываясь на выводах работы [19], влиянием вращения на процесс проникания ударников в преграды пренебрегают (см. [20]). Но исключение из рассмотрения вращения не всегда корректно. Как показано в [21, 22], в результате вращательного движения в ударнике еще до момента встречи с преградой формируется напряженно-деформированное состояние, которое может повлиять на процесс его взаимодействия с преградой и зависит от физико-механических свойств материалов ударника и преграды, геометрических и кинематических параметров ударника.

2. Математическая постановка задачи

2.1. Основные уравнения математической модели

Движение участвующих в ударном процессе тел рассматривается в адиабатической постановке. Система уравнений, описывающих нестационарные движения сжимаемой среды в произвольной системе координат x^i ($i = 1, 2, 3$) включает уравнения [21, 22]:

– неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla_i v^i = 0; \tag{1}$$

– движения

$$\rho a^k = \nabla_i \sigma^{ik} + F^k, \tag{2}$$

где $a^k = \frac{\partial v^k}{\partial t} + v^i \nabla_i v^k$, $\nabla_i \sigma^{ik} = \sigma_{,i}^{ik} + \Gamma_{im}^k \sigma^{im} + \Gamma_{im}^m \sigma^{ik}$,

– энергии

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma^{ij} e_{ij}. \tag{3}$$

В (1)–(3) приняты обозначения: t — время; ρ — плотность среды; v^i — компоненты вектора скорости; σ^{ij} — контравариантные компоненты симметричного тензора напряжений; F^k — компоненты вектора массовых сил; Γ_{ij}^k — символы Кристоффеля; E — удельная внутренняя энергия; e_{ij} — компоненты симметричного тензора скоростей деформаций: $e_{ij} = (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i)/2$; компоненты тензора напряжений представляются в виде суммы девиаторной — S^{ki} , и шаровой (давления) — P , частей:

$$\sigma^{ij} = -Pg^{ij} + S^{ij}, \tag{4}$$

где g^{ij} — компоненты метрического тензора.

Давление в металлических материалах определяется, согласно уравнению Ми–Грюнайзена, как функция удельной внутренней энергии E и плотности ρ :

$$P = \sum_{n=1}^3 K_n \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right)^n + K_0 \rho E, \tag{5}$$

где K_0, K_n — константы материала, V_0 — начальный удельный объем, V — текущий удельный объем.
 Для расчета давления в керамике V_4C используется уравнение состояния [23]:

$$P = \left[\exp\left(4b \frac{V_0 - V}{V_0}\right) - 1 \right] \frac{\rho_0 c_0^2}{4b}. \tag{6}$$

При этом ρ_0 — начальная плотность; V_0 и V — начальный и текущий удельные объемы; c_0 и b — коэффициенты ударной адиабаты: $D = c_0 + bu_m$, D — скорость ударной волны, u_m — массовая скорость. Исследуемым далее скоростям взаимодействия отвечают значения коэффициентов ударной адиабаты [15, 16]: $c_0 = 10.2$ км/с, $b = 0.85$.

Предположив, что для рассматриваемых материалов справедлив принцип минимума работы истинных напряжений на приращениях пластических деформаций, запишем связь компонент тензора скоростей деформаций и дивергента напряжений в виде:

$$2G(g^{im}g^{jk}e_{mk} - g^{mk}e_{mk}g^{ij}/3) = \frac{DS^{ij}}{Dt} + \lambda S^{ij} \quad (\lambda \geq 0). \tag{7}$$

Здесь G — модуль сдвига; поправка на поворот определяется с помощью коротационной производной Яуманна:

$$\frac{DS^{ij}}{Dt} = \frac{dS^{ij}}{dt} - g^{im}\omega_{mk}S^{kj} - g^{jm}\omega_{mk}S^{ik},$$

где $\omega_{ij} = (\nabla_i v_j - \nabla_j v_i)/2$. Если выполняется условие Мизеса:

$$S^{ij}S_{ij} \leq 2\sigma_d^2/3, \tag{8}$$

то материал ведет себя упруго ($\lambda = 0$), если оно нарушается, то поведение пластическое ($\lambda > 0$). Динамический предел текучести σ_d в (8) в общем случае может быть функцией скоростей деформаций, давления и температуры. Для рассматриваемого диапазона скоростей динамический предел текучести полагаем постоянным.

Посчитав, что пластическая деформация не приводит к изменению объема, в качестве локального критерия разрушения металлов выберем предельную величину интенсивности пластических деформаций [24]:

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{3T_2 - T_1^2}, \tag{9}$$

где T_1, T_2 — первый и второй инварианты тензора деформаций, значение e_u , как и σ_d , полагаем постоянным. Разрушение керамики V_4C будем оценивать с помощью деформационного критерия и с учетом различия ее прочности при сжатии и растяжении [12, 25, 26]:

$$\varepsilon_c < \varepsilon_{ii} < \varepsilon_t \quad (i = 1, 2, 3), \tag{10}$$

где ε_c — предел прочности на сжатие, ε_t — предел прочности на растяжение. При нарушении условия (10) материал полагается разрушенным.

2.2. Постановка задачи

Задача формулируется в декартовых координатах XYZ ($x^1 = x, x^2 = y, x^3 = z, \Gamma_{ij}^k = 0, \sigma^{ij} = \sigma_{ij}, g^{ij} = \delta_{ij}$, где δ_{ij} — символ Кронекера, $i, j = 1, 2, 3$). Моделируется нормальное ($\alpha = 0^\circ$) и косое ($\alpha \neq 0^\circ$) взаимодействие оживальных (с формой головной части, промежуточной между конусом и эллипсоидом) ударников с двухслойной преградой (Рис. 1). Ударник состоит из высокопрочного стального сердечника (область D_3), латунной

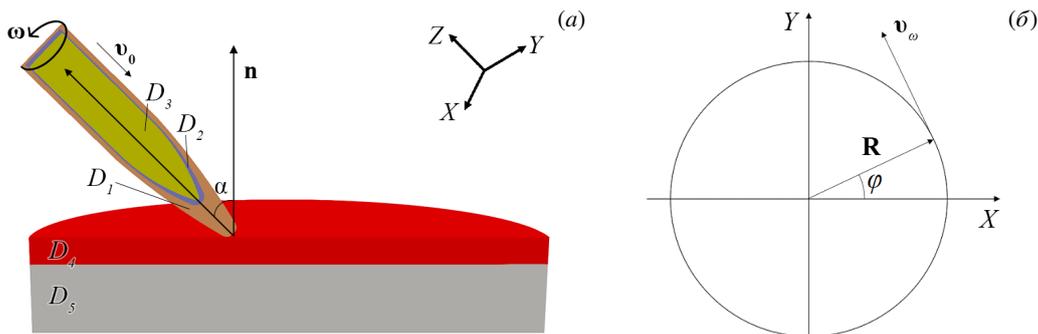


Рис. 1. Схема к постановке задачи

оболочки (D_2) и свинцового наполнителя (D_1). Преграда представляет собой двухслойную конструкцию, верхний слой которой изготовлен из карбида бора B_4C (область D_4), а нижний — из алюминия (D_5). Вектор скорости ударника \mathbf{v}_0 и его ось симметрии в начальный момент времени совпадают с осью Z и образуют с нормалью к преграде угол α . Помимо поступательного движения со скоростью \mathbf{v}_0 , ударник вращается вокруг своей оси с начальной угловой скоростью $|\boldsymbol{\omega}_0| = 2\pi\nu$, где ν — частота вращения, показывающая число оборотов ударника в секунду. Линейная скорость вращательного движения точек ударника представляется как векторное произведение:

$$\mathbf{v}_\omega = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}, \tag{11}$$

где \mathbf{R} — радиус-вектор произвольной точки. Проекции вектора скорости \mathbf{v}_ω на оси X и Y определяются соотношениями: $v_\omega^1 = |\mathbf{v}_\omega| \sin\varphi$ и $v_\omega^2 = |\mathbf{v}_\omega| \cos\varphi$ (Рис. 1б). Проекция \mathbf{v}_ω на ось Z равняется нулю: $v_\omega^3 = 0$.

Для уравнений (1)–(11) ставится задача с начальными и граничными условиями:

– при $t = 0$

$$\sigma_{ij} = P = E = 0|_{(x^i) \in D_k} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (k = \overline{1, 5}); \tag{12}$$

$$v^1 = |\mathbf{v}_\omega| \sin\varphi|_{(x^i) \in D_k}, \quad v^2 = |\mathbf{v}_\omega| \cos\varphi|_{(x^i) \in D_k}, \quad v^3 = -|\mathbf{v}_0| \quad (i, k = 1, 2, 3); \tag{13}$$

$$v^i = 0|_{(x^i) \in D_k} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (k = 3, 4, 5); \tag{14}$$

$$\rho = \rho_i|_{(x^i) \in D_k} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (k = \overline{1, 5}); \tag{15}$$

– на контактных поверхностях между всеми областями D_k ($k = \overline{1, 5}$) реализуется условие скольжения без трения

$$T_{nn}^+ = T_{nn}^-, \quad T_{n\tau}^+ = T_{n\tau}^- = T_{ns}^+ = T_{ns}^- = 0, \quad v_n^+ = v_n^-; \tag{16}$$

– на свободных поверхностях задается условие отсутствия напряжений

$$T_{nn} = T_{ns} = T_{n\tau} = 0. \tag{17}$$

Здесь \mathbf{n} — единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке; $\boldsymbol{\tau}$ и \mathbf{s} — взаимно перпендикулярные единичные векторы в плоскости, касательной к поверхности в этой точке; \mathbf{T}_n — вектор силы на площадке с нормалью \mathbf{n} . Нижние индексы у векторов \mathbf{T}_n и \mathbf{v} означают проекции на соответствующие векторы базиса. Система уравнений (1)–(11) совместно с начальными и граничными условиями (12)–(17) полностью определяет краевую задачу.

Геометрические параметры и материалы ударника полностью соответствуют данным, приведенным в [25, 26]: материалом сердечника является высокопрочная сталь твердостью по Роквеллу 63 HRC, плотностью $\rho_0 = 7800 \text{ кг/м}^3$ с динамическим пределом текучести $\sigma_d = 2.7 \text{ ГПа}$, диаметр сердечника $D_c = 6.172 \text{ мм}$, длина сердечника $L_c = 27.43 \text{ мм}$, $L_c/D_c = 4.44$; диаметр ударника с биметаллической оболочкой $D_s = 7.836 \text{ мм}$, длина ударника $L_s = 35.31 \text{ мм}$, $L_s/D_s = 4.5$, материал внешней оболочки — латунь плотностью $\rho_0 = 8920 \text{ кг/м}^3$ с пределом текучести $\sigma_d = 100 \text{ МПа}$, наполнитель состоит из свинца плотностью $\rho_0 = 11400 \text{ кг/м}^3$ с пределом текучести $\sigma_d = 10 \text{ МПа}$. Полный вес ударника составляет 10.8 г, вес стального сердечника — 5.3 г.

Толщина верхнего слоя двухслойной преграды равняется 3.75 мм, материал — карбид бора B_4C плотностью $\rho_0 = 2490 \text{ кг/м}^3$ с динамическим пределом текучести $\sigma_d = 15 \text{ ГПа}$ [15, 16] и пределами прочности $\varepsilon_c = -0.27$ и $\varepsilon_t = 0.1$ [12, 24, 25]; нижний слой преграды — массив из алюминия Al 5083 плотностью $\rho_0 = 2640 \text{ кг/м}^3$ с пределом текучести $\sigma_d = 120 \text{ МПа}$.

Начальная скорость ударника в расчетах соответствует экспериментальной [25, 26] $|\mathbf{v}_0| = 841 \text{ м/с}$, частота вращения ударника $\nu = 0 \div 10000 \text{ об/с}$. Рассмотрен диапазон углов взаимодействия $\alpha = 0 \div 45^\circ$. Задача решается численно, методом конечных элементов с использованием авторского программного 3D комплекса EFES 2.0 [21, 22].

3. Обсуждение результатов

Для оценки эффективности керамических преград широко применяется метод DOP (Depth-Of-Penetration) [25–34], основанный на сравнении результатов метания ударника как в монолитную металлическую, так и в двухслойную преграду, у которой верхний слой — керамическая пластина, нижний — металлический массив. По соотношению глубин проникания ударника в слоистую металлокерамическую и монолитную преграды делается вывод об эффективности защитных свойств керамической пластины. Несомненным достоинством метода DOP является простота и надежность, поскольку глубина проникания может быть измерена точно. Также метод DOP может применяться для валидации математических моделей и численных алгоритмов.

В таблице 1 приведены глубины кратеров, образованных в массивной алюминиевой преграде при разной толщине керамического слоя, полученные в эксперименте [25, 26] и в расчете. С учетом того, что в экспериментах для метания ударника использованы нарезные стволы Манна, в которых ударнику сообщается вращательное движение с частотой около 3000 об/с [35], в тестовых расчетах ударник тоже вращается с частотой $\nu = 3000 \text{ об/с}$. Наблюдается хорошее согласование результатов, относительная погрешность δ не превышает 8%, что позволяет сделать вывод об адекватности и математической модели, и численного алгоритма. Далее обсуждаются авторские

Таблица 1. Свойства материала

Толщина керамического слоя, мм	Глубина кратера, мм		Погрешность δ , %
	эксперимент	расчет	
1.25	40.6	37.8	6.9
2.5	33.4	33.2	0.6
3.75	10.1	9.3	7.9
5	0	0	0

результаты параметрических численных исследований влияния биметаллической оболочки и вращения ударника на процесс его взаимодействия с металлокерамической преградой при нормальном ($\alpha = 0^\circ$) и косом ($\alpha \neq 0^\circ$) ударе. Толщина лицевого слоя керамики В₄С составляет 3.75 мм, начальная скорость ударника соответствует экспериментальной $|\mathbf{v}_0| = 841$ м/с.

На рисунке 2 в последовательные моменты времени в сечении ZX приведены расчетные конфигурации взаимодействия с металлокерамической преградой высокопрочного стального сердечника (без оболочки и наполнителя) без вращения (Рис. 2а) и с вращением вокруг своей оси (Рис. 2б). Как видно, сердечник не проникает в алюминиевую преграду, наблюдается его отскок. Полное пробитие керамического слоя не происходит, в обоих случаях сердечник образует в нем кратер глубиной 2.7 мм. При этом остаточная длина сердечника равняется 10.1 мм, что составляет 37% от его начальной длины. Конфигурации свидетельствуют об активном эрозионном разрушении сердечника при проникании в керамический слой, что приводит к снижению его кинетической энергии и, как следствие, к уменьшению проникающей способности.

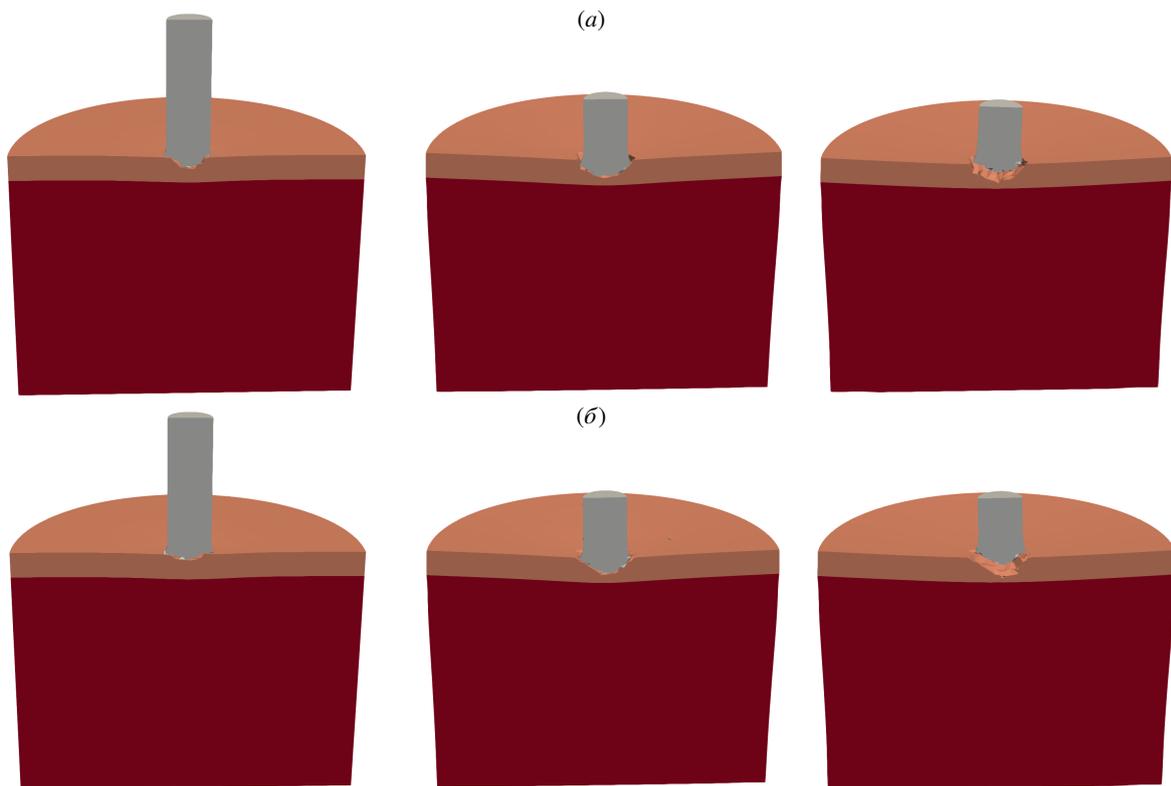


Рис. 2. Конфигурации сердечника и преграды в сечении ZX через 10, 30 и 100 мкс при ударе под углом $\alpha = 0^\circ$ и разной частоте вращения сердечника ν , об/с: 0 (а), 3000 (б)

Рисунок 3 иллюстрирует взаимодействие полного ударника (сердечник+оболочка+наполнитель) без вращения (Рис. 3а) и с вращением (Рис. 3б). Сравнение результатов моделирования процесса при ударе сердечником (Рис. 2) и полным ударником (Рис. 3) показывает, что на начальной стадии (до $t = 10$ мкс) оболочка способствует уменьшению объема эрозионного разрушения в сердечнике и сохранению формы его головной части. В процессе внедрения ударника в преграду «снимается» с сердечника. В случае полного ударника керамический слой перфорируется, при этом невращающийся ударник ($\nu = 0$) погружается в алюминиевую преграду на 10.9 мм, а вращающийся ($\nu = 3000$ об/с) — на 9.3 мм.

Таким образом, при рассмотренных условиях проникающая способность невращающегося ударника на 15% выше. Снижение глубины проникания при вращении обусловлено формированием во вращающемся ударнике

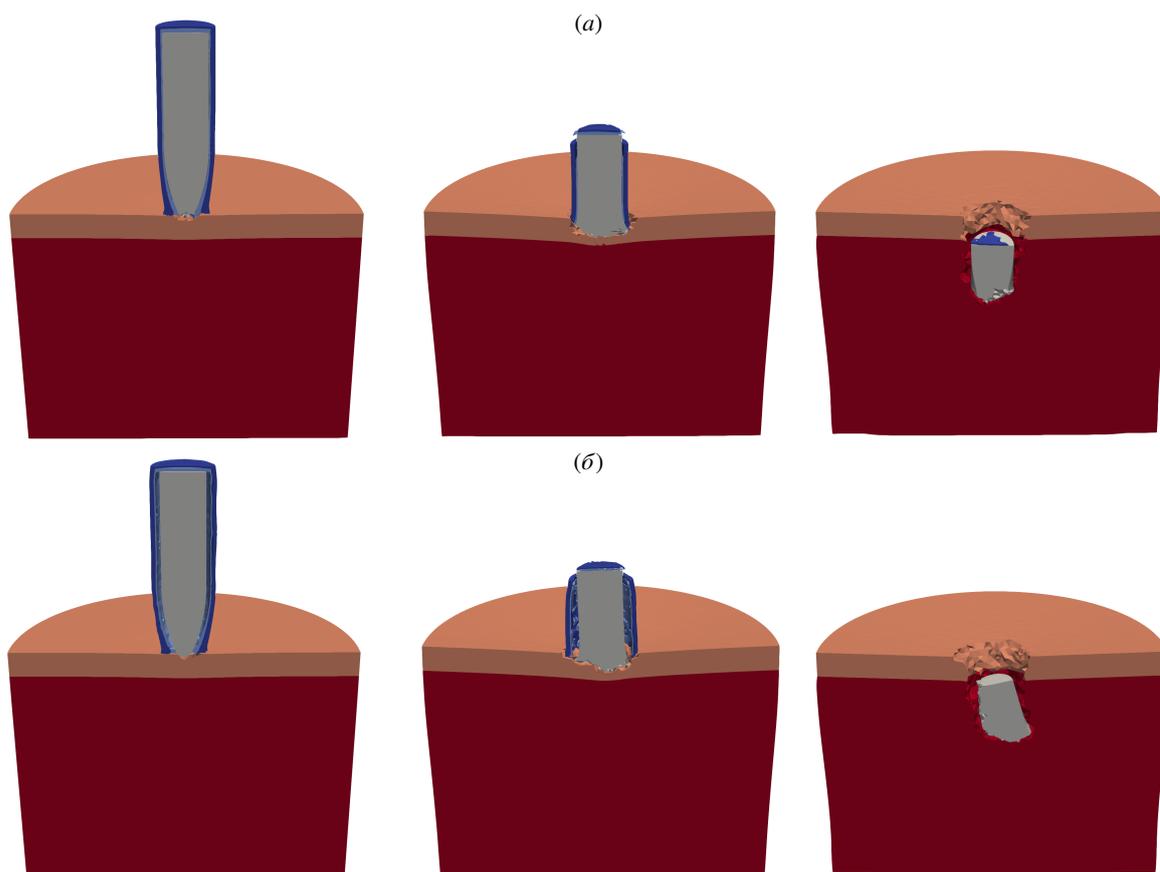


Рис. 3. Конфигурации полного ударника и преграды в сечении ZX через 10, 30 и 100 мкс при ударе под углом $\alpha = 0^\circ$ и разной частоте вращения ударника ν , об/с: 0 (а), 3000 (б)

напряженно-деформированном состоянии (НДС). В ударнике возникают как нормальные напряжения, вызванные центробежными силами, так и сдвиговые напряжения, обусловленные различием линейных скоростей (10) в точках ударника, расположенных на разных расстояниях от его оси вращения [21, 22]. При этом максимальные значения сдвиговых напряжений достигаются вблизи боковой поверхности сердечника. В результате происходит интенсификация контактного взаимодействия ударника с керамическим слоем, что увеличивает эрозионное разрушение сердечника и уменьшает кинетическую энергию ударника. В то же время уровень НДС при $\nu = 3000$ об/с не оказывает заметного влияния на разрушение керамического слоя. Также при сравнении степеней проникновения сердечника (Рис. 2) и полного ударника (Рис. 3) необходимо учитывать очевидный факт, что масса сердечника составляет лишь 49% от массы полного ударника, соответственно, его кинетическая энергия также на 49% меньше кинетической энергии полного ударника.

С увеличением частоты вращения до $\nu = 10000$ об/с наблюдается интенсивный радиальный разлет фрагментов разрушающейся металлической оболочки (Рис. 4). В этом случае глубина кратера в алюминиевой преграде составляет 11.5 мм, что больше глубины кратера на 5.5% при $\nu = 0$ и на 23.6% при $\nu = 3000$ об/с. Это обусловлено тем, что при $\nu = 10000$ об/с образовавшееся в сердечнике НДС способствует интенсификации эрозии керамического слоя в контактной зоне, и к моменту времени $t = 30$ мкс стальной сердечник практически полностью разрушает керамический слой. В случае же невращающегося ударника (Рис. 3а) и частоты вращения $\nu = 3000$ об/с (Рис. 3б) перед сердечником в момент времени $t = 30$ мкс находится неразрушенный слой керамики толщиной 1.7 мм.

Анализ влияния вращения ударника на разрушение материалов в контактной зоне показывает, что с увеличением скорости вращения растет уровень сдвиговых напряжений на контактной границе ударника с керамическим слоем. Следствием этого является интенсификация эрозионного разрушения сердечника. При частотах ниже 3000 об/с керамика не разрушается, но с увеличением скорости вращения ударника до $\nu = 10000$ об/с керамический слой начинает активно крошиться, и ударник проникает на большую глубину. Таким образом, увеличение частоты вращения ударника с 3000 до 10000 об/с приводит к увеличению проникающей способности оболочечного ударника при взаимодействии с металлокерамической преградой.

Для проверки корректности моделирования полного ударника (сердечник+металлическая оболочка+наполнитель) проведены расчеты для нормального взаимодействия монолитного ударника с металлокерамической преградой. Монолитный ударник полагался стальным (как сердечник) и имел такую же геометрию (диаметр, длину, форму головной части), как у полного ударника. На рисунке 5 показаны итоговые конфигурации монолитного стального ударника и преграды для частот вращения 0, 3000 и 10000 об/с. Начальная

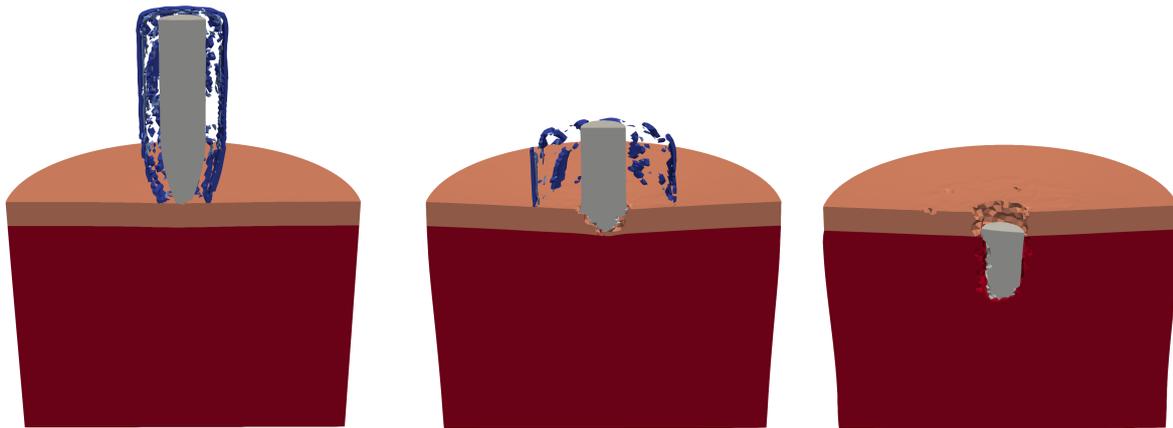


Рис. 4. Конфигурации полного ударника и преграды в сечении ZX через 10, 30 и 100 мкс при ударе под углом $\alpha = 0^\circ$ и частоте вращения ударника $\nu = 10000$ об/с

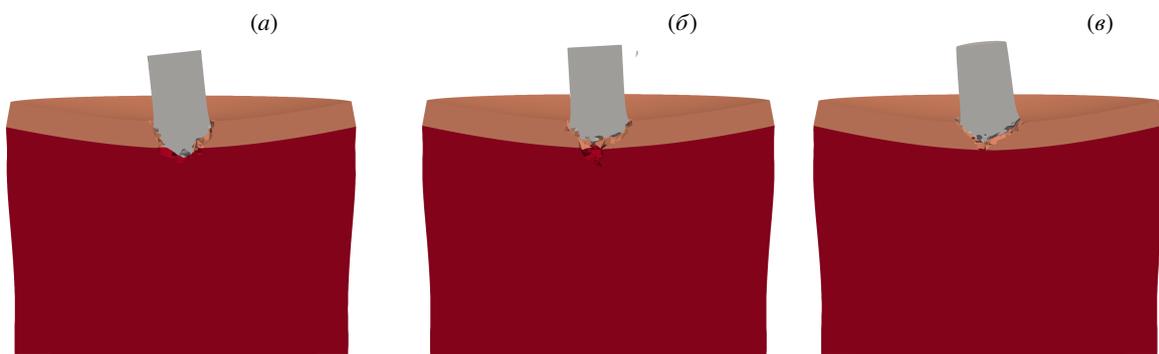


Рис. 5. Конфигурации монолитного (стального) ударника и преграды в сечении ZX в момент времени $t = 100$ мкс при ударе под углом $\alpha = 0^\circ$ и разной частоте вращения ударника ν , об/с: 0 (а), 3000 (б), (10000 (в))

скорость также равнялась 841 м/с. Монолитный стальной ударник имел массу на 5.7% меньше, чем у полного ударника (и, соответственно, его кинетическая энергия была меньше на 5.7%). При этом глубины кратеров в алюминиевой преграде существенно отличаются от соответствующих глубин проникания полного ударника и составляют лишь 3, 2 и 0 мм для частот вращения 0, 3000 и 10000 об/с соответственно. Из данного результата следует, что при моделировании взаимодействия полного ударника с металлокерамической преградой необходимо учитывать и оболочку, и наполнитель.

Также проведены исследования косоугольного взаимодействия сердечника, полного ударника и монолитного стального ударника с металлокерамической преградой. Рисунок 6 содержит конфигурации сердечника и преграды при ударе под углом $\alpha = 30^\circ$ (напомним, что α — угол между продольной осью ударника и нормалью к преграде). Расчеты показывают, что уже при $\alpha = 30^\circ$ происходит рикошет сердечника от металлокерамической преграды, при этом повреждается только керамический слой, в котором образуется неглубокий кратер. Для случая вращающегося сердечника (Рис. 6б) поврежденная зона керамического слоя несколько протяженнее. Это обусловлено ударом тыльной части сердечника по преграде при повторном рикошете. При отсутствии керамического слоя и углах $\alpha \leq 45^\circ$ рикошет сердечника не наблюдается (Рис. 7). Видно, что при частотах вращения 0 и 3000 об/с сердечник

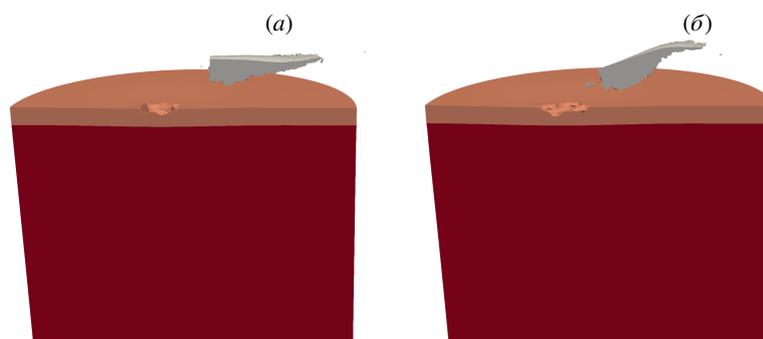


Рис. 6. Конфигурации сердечника и преграды в сечении ZX после момента времени $t = 100$ мкс при ударе под углом $\alpha = 30^\circ$ и разной частоте вращения сердечника ν , об/с: 0 (а), 3000 (б)

сохраняет начальную траекторию движения по мере проникания в преграду (Рис. 7а, б), но при $\nu = 10000$ об/с (Рис. 7в) при контакте с преградой он поворачивается (как при рикошете) и дальше движется в плоскости ZX преграды плашмя, контактирует с ней боковой поверхностью; его скорость падает до нуля. В этом случае размер образованного в преграде кратера в сечении ZX практически равен длине внедряющегося сердечника.

На рисунке 8 приведены конфигурации полного ударника при взаимодействии с металлокерамической преградой под углом $\alpha = 30^\circ$ и с частотами вращения 0, 3000 и 10000 об/с. Кратер глубиной 3 мм в алюминиевой

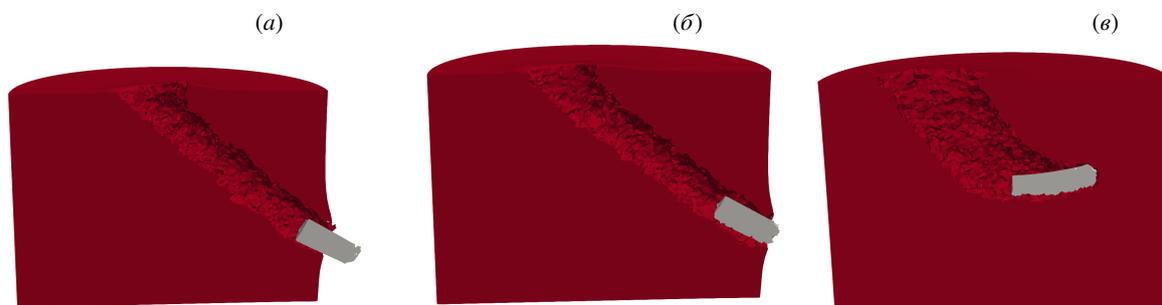


Рис. 7. Конфигурации сердечника и алюминиевой преграды в сечении ZX после момента времени $t = 200$ мкс при ударе под углом $\alpha = 45^\circ$ и разной частоте вращения сердечника ν , об/с: 0 (а), 3000 (б), 10000 (в)

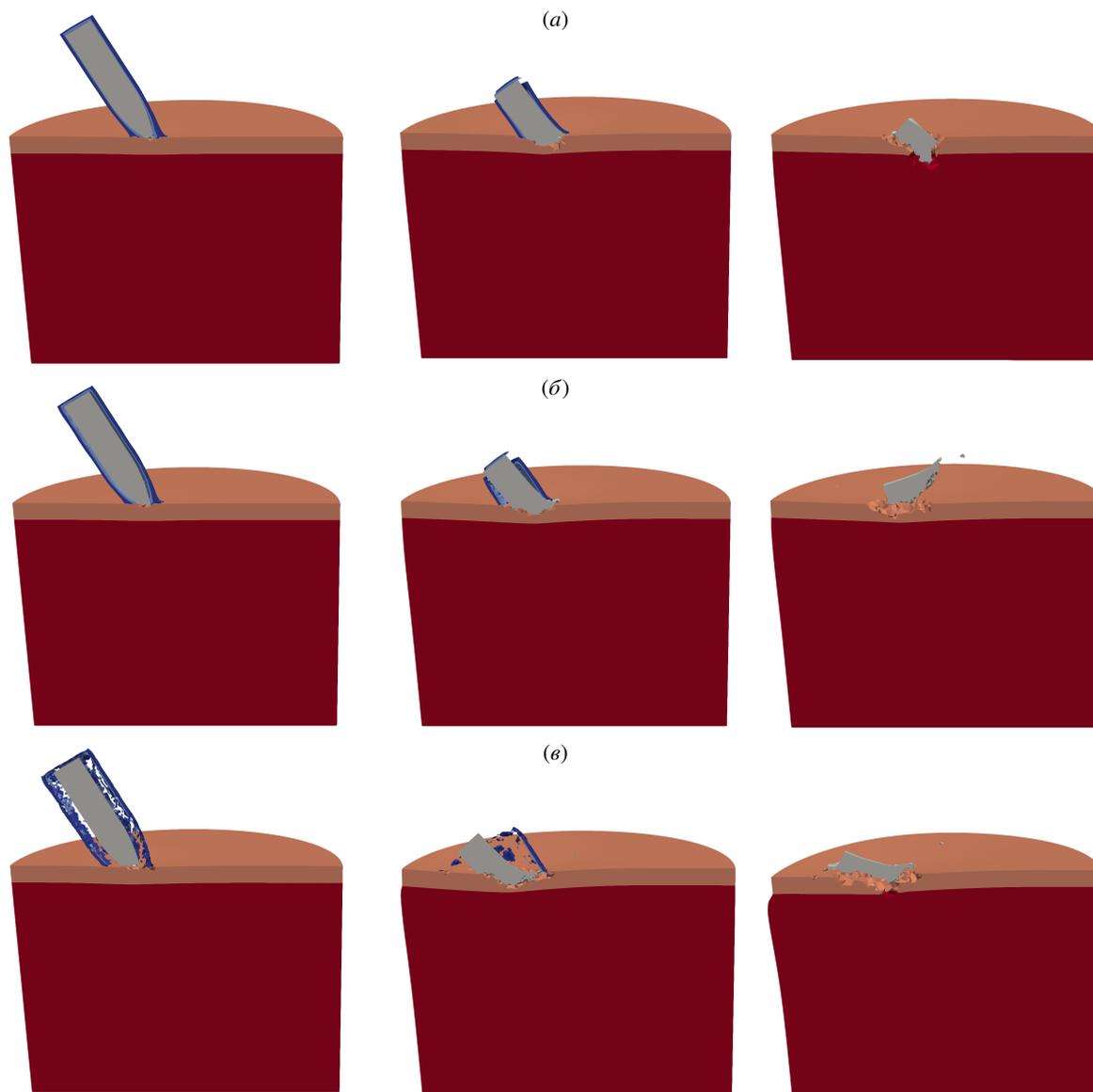


Рис. 8. Конфигурации полного ударника и преграды в сечении ZX в моменты времени 10, 30 и 100 мкс при ударе под углом $\alpha = 30^\circ$ и разной частоте вращения ударника ν , об/с: 0 (а), 3000 (б), 10000 (в)

преграде образуется только в случае невращающегося ударника (Рис. 8а). При проникании вращающегося ударника (Рис. 8б, в) происходит рикошет без разрушения алюминиевого слоя преграды.

На рисунке 9 представлены кривые изменения во времени угла α_v между нормалью к металлокерамической преграде и вектором скорости центра масс полного ударника и сердечника при косом ударе под углом $\alpha = 30^\circ$ (Рис. 9а) и $\alpha = 45^\circ$ (Рис. 9б). Значения $\alpha_v \geq 90^\circ$ соответствуют рикошету ударника. Как следует из графиков, рикошет не возникает только при невращающемся полном ударнике и угле взаимодействия $\alpha = 30^\circ$ (кривая 1, Рис. 9а). Во всех других случаях наблюдается быстрое увеличение значения α_v и рикошет как сердечника, так и полного ударника, причем увеличение α_v для сердечника происходит раньше, чем для полного ударника. Этот результат качественно согласуется с ранее полученными данными [21, 22].

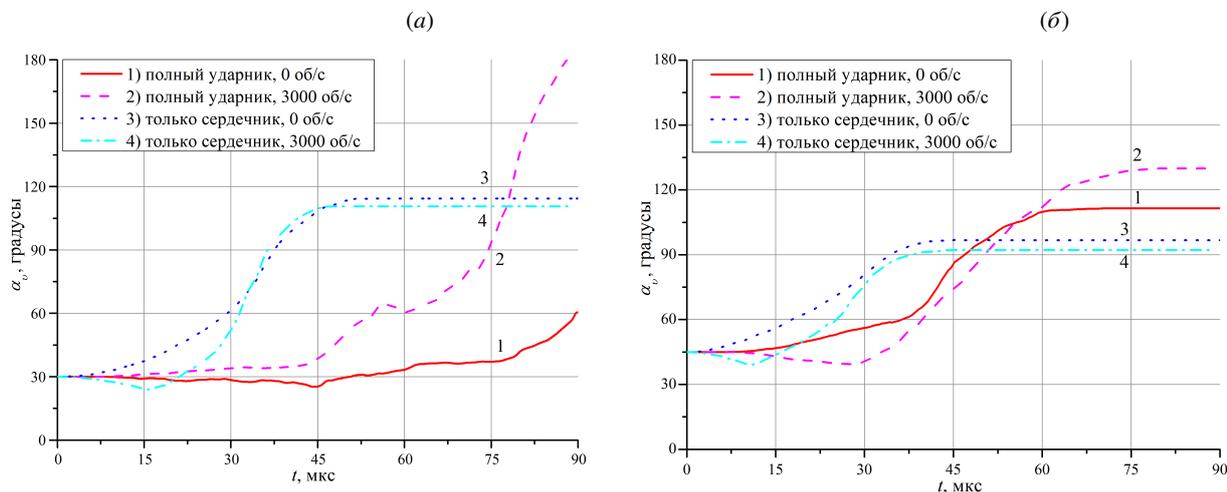


Рис. 9. Изменение во времени величины угла α_v между нормалью к преграде и вектором скорости центра масс ударного инструмента при косом ударе под углом $\alpha = 30^\circ$ (а) и $\alpha = 45^\circ$ (б)

В таблице 2 приведены данные, характеризующие итог взаимодействия сердечника, полного ударника и монолитного стального ударника с металлокерамической преградой — глубина кратера в алюминиевой преграде и состояние ударника после взаимодействия (торможение, отскок, рикошет). Анализ результатов показывает, что при валидации математической модели и вычислительного алгоритма необходимо учитывать реальную конструкцию ударного инструмента (в данном случае наличие металлической оболочки и наполнителя) и кинематические условия (его вращение).

Таблица 2. К сравнению результатов косого удара с начальной скоростью 841 м/с по алюминиевой преграде с толщиной керамического слоя 3.75 мм

Ударный инструмент	Частота вращения v , об/с	Удар под углом α , град					
		0		30		45	
		глубина кратера, мм	состояние инструмента	глубина кратера, мм	состояние инструмента	глубина кратера, мм	состояние инструмента
Сердечник	0	0	отскок	0	рикошет	0	рикошет
	3000	0	отскок	0	рикошет	0	рикошет
Полный ударник	0	10.9	торможение	3	торможение	0	рикошет
	3000	9.3	торможение	0	рикошет	0	рикошет
	10000	11.5	торможение	0	рикошет	0	рикошет
Стальной монолитный ударник	0	3	отскок	0	рикошет	0	рикошет
	3000	2	отскок	0	рикошет	0	рикошет
	10000	0	отскок	0	рикошет	0	рикошет

4. Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы.

1. Предложенная математическая модель адекватно описывает процесс взаимодействия ударника с металлокерамической преградой и позволяет проводить параметрические исследования влияния кинематических, геометрических и конструктивных факторов на процесс.

2. Для рассмотренных условий взаимодействия конструктивные элементы полного ударника (оболочка, наполнитель) оказывают существенное влияние на его взаимодействие с преградой. Для адекватного моделирования и прогнозных расчетов необходимо учитывать реальную конструкцию ударного инструмента.
3. Расчеты подтвердили, что оболочка и наполнитель обеспечивают сохранность сердечника на начальном этапе процесса взаимодействия ударника с металлокерамической преградой.
4. В присутствии керамического слоя наблюдается рикошет сердечника уже при угле взаимодействия $\alpha = 30^\circ$.
5. Вращение полного ударника может оказывать существенное влияние на разрушение участвующих в ударном процессе тел и на состояние ударного инструмента. При этом до скоростей вращения 3000 об/с интенсифицируется эрозионное разрушение сердечника, что снижает его проникающую способность. С увеличением частоты вращения до 10000 об/с большее разрушение испытывает керамический слой преграды, что приводит к увеличению глубины проникания сердечника. В то же время при косом ударе вращение полного ударника способствует его рикошету.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет–2030). Математическая модель и программный комплекс EFES созданы в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проект FWRW-2021-0002.

Литература

1. *Iremonger M.J., Hazell P.J.* Influence on small arms bullet construction on terminal ballistics // Proceedings of the 21st International Symposium on Ballistics / ed. by N. Burman, J. Anderson, G. Katselis. Adelaide, Australia, 2004. P. 767–773.
2. *Crouch I.G., Appleby-Thomas G., Hazell P.J.* A study of the penetration behaviour of mild-steel-cored ammunition against boron carbide ceramic armours // International Journal of Impact Engineering. 2015. Vol. 80. P. 203–211. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.03.002
3. *Hazell P.J., Appleby-Thomas G.J., Philbey D., Tolman W.* The effect of gilding jacket material on the penetration mechanics of a 7.62 mm armour-piercing projectile // International Journal of Impact Engineering. 2013. Vol. 54. P. 11–18. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.10.013
4. *Forrestal M.J., Børvik T., Warren T.L.* Perforation of 7075-T651 Aluminum Armor Plates with 7.62 mm APM2 Bullets // Experimental Mechanics. 2010. Vol. 50, no. 8. P. 1245–1251. DOI: 10.1007/S11340-009-9328-4
5. *Roberts A., Appleby-Thomas G.J., Wood D.C., Hameed A., Crouch I.G.* Dynamic jacket removal and the 'bullet's journey' // Proceedings of the 29th International Symposium on Ballistics / ed. by C. Woodley, I. Cullis. Edinburgh, United Kingdom, 2016. P. 2307–2315.
6. *Gooch W.A., Burkins M.S., Kingman P., Hauver G., Netherwood P., Benck R.* Dynamic X-ray imaging of 7.62-mm APM2 projectiles penetrating boron carbide // Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics. Vol. 2 / ed. by W. Reinicke. San Antonio, Texas, USA, 1999. P. 901–908.
7. *Rosenberg Z., Yeshurun Y., Tsaliah J.* More on the thick-backing screening technique for ceramic tiles against AP projectiles // Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics. San Antonio, Texas: American Defense Preparedness Association, 1990. P. 197–201.
8. *Cosquer Y., Longère P., Pantalé O., Gailhac C.* Experiment/simulation correlation-based methodology for metallic ballistic protection solutions // Defence Technology. 2023. Vol. 29. P. 24–38. DOI: 10.1016/j.dt.2023.03.006
9. *Binar T., Švarc J., Vyroubal P., Kazda T., Rolc S., Dvořák A.* The comparison of numerical simulation of projectile interaction with transparent armour glass for buildings and vehicles // Engineering Failure Analysis. 2018. Vol. 92. P. 121–139. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.05.009
10. *Fras T.* On the effect of pitch and yaw angles in oblique impacts of small-caliber projectiles // Defence Technology. 2024. Vol. 31. P. 73–94. DOI: 10.1016/j.dt.2023.06.004
11. *Pavlovic A., Fragassa C.* Investigating the resistance of reinforced barriers to high velocity projectiles // Engineering Structures. 2018. Vol. 174. P. 384–395. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.074
12. *Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I.* Impact resistance of ceramics in a numerical experiment // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2020. Vol. 61, no. 5. P. 847–854. DOI: 10.1134/S002189442005020X
13. *Holmquist T.J., Johnson G.R.* Response of boron carbide subjected to high-velocity impact // International Journal of Impact Engineering. 2008. Vol. 35. P. 742–752. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.08.003
14. *Fernández-Fdz D., Zaera R., Fernández-Sáez J.* A constitutive equation for ceramic materials used in lightweight armors // Computers & Structures. 2011. Vol. 89, no. 23/24. P. 2316–2324. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.08.003
15. *Grady D.E.* Hugoniot equation of state and dynamic strength of boron carbide // Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 117. 165904. DOI: 10.1063/1.4918604
16. *Молодец А.М., Гольшев А.А., Шахрай Д.В.* Уравнения состояния и кривая плавления карбида бора в области высоких давлений ударного сжатия // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 151, № 3. С. 550–557. DOI: 10.7868/S0044451017030000
17. *Савиных А.С., Черепанов И.А., Разоренов С.В., Овсиенко А.И., Румянцев В.И., Орданьян С.С.* Эволюция ударных волн в горячепрессованных керамиках карбида бора и карбида кремния // Журнал технической физики. 2018. Т. 88, № 12. С. 1813–1819. DOI: 10.21883/JTF.2018.12.46782.38-18

18. *Савиных А.С., Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Румянцев В.И.* Динамическая прочность реакционно-спеченной керамики карбида бора // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 6. С. 77–82.
19. *Krafft J.M.* Surface Friction in Ballistic Penetration // Journal of Applied Physics. 1955. Vol. 26, no. 10. P. 1248–1253. DOI: 10.1063/1.1721884
20. *Goldsmith W.* Non-ideal projectile impact on targets // International Journal of Impact Engineering. 1999. Vol. 22. P. 95–395. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00031-1
21. *Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V.* Effect of Projectile Rotation on High-Velocity Impact Fracture // Physical Mesomechanics. 2022. Vol. 25. P. 119–128. DOI: 10.1134/S1029959922020035
22. *Радченко П.А., Радченко А.В., Батуев С.П.* Численное исследование высокоскоростного взаимодействия вращающихся ударников с различной формой головной части с преградой конечной толщины // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 87. С. 120–134. DOI: 10.17223/19988621/87/10
23. *Канель Г.И., Щербань В.В.* Пластическая деформация и откольное разрушение железа «Армок» в ударной волне // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 4. С. 93–103.
24. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Том 2. М.: Наука, 1970. 568 с.
25. *Moynihan T.J., Chou S.-C., Mihalcin A.L.* Application of the Depth-of-Penetration Test Methodology to Characterize Ceramics for Personnel Protection. Army Research Laboratory. ARL-TR-2219. 2000. 43 p.
26. *Carton E.P., Johnsen B.B., Rahbek D.-B., Broos H., Snippe A.* Round robin using the depth of penetration test method on an armour grade alumina // Defence Technology. 2019. Vol. 15, no. 6. P. 829–836. DOI: 10.1016/j.dt.2019.07.014
27. *Rosenberg Z., Bless S., Yeshurun Y., Okajima K.* A new definition of ballistic efficiency of brittle materials based on the use of thick backing plates // Proceedings of the "IMPACT 87" Symposium. Impact loading and dynamic behavior of materials / ed. by C. Chiem, H.-D. Kunze, L. Meyer. DCM Informationsgesellschaft Verlag, 1988. P. 491–498.
28. *Rozenberg Z., Yeshurun Y.* The relation between ballastic efficiency and compressive strength of ceramic tiles // International Journal of Impact Engineering. 1988. Vol. 7, no. 3. P. 357–362. DOI: 10.1016/0734-743X(88)90035-8
29. *Cui F., Wu G., Ma T., Li W.* Effect of Ceramic Properties and Depth-of-penetration Test Parameters on the Ballistic Performance of Armour Ceramics // Defence Science Journal. 2017. Vol. 67, no. 3. P. 260–268. DOI: 10.14429/DSJ.67.10664
30. *Franzen R.R., Orphal D.L., Anderson C.E.* The influence of experimental design on depth-of-penetration (DOP) test results and derived ballistic efficiencies // International Journal of Impact Engineering. 1997. Vol. 19, no. 8. P. 727–737. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00010-9
31. *Woodward R.L., Baxter B.J.* Ballistic evaluation of ceramics: Influence of test conditions // International Journal of Impact Engineering. 1994. Vol. 15, no. 2. P. 119–124. DOI: 10.1016/S0734-743X(05)80024-7
32. *Rosenberg Z., Dekel E.* Terminal Ballistics. Springer International Publishing, 2020. 420 p.
33. *Hazell P.J.* Measuring the strength of brittle materials by depth-of-penetration testing // Advances in Applied Ceramics. 2010. Vol. 109, no. 8. P. 504–510. DOI: 10.1179/174367610X12804792635387
34. *Venkatesan J., Iqbal M.A., Madhu V.* Ballistic Performance of Bilayer Alumina/Aluminium and Silicon Carbide/Aluminium Armours // Procedia Engineering. 2017. Vol. 173. P. 671–678. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.141
35. *Corriveau D., Petre C.F.* Influence of chamber misalignment on cased telescoped (CT) ammunition accuracy // Defence Technology. 2016. Vol. 12, no. 2. P. 117–123. DOI: 10.1016/j.dt.2015.11.008

Сведения об авторах:

Радченко Павел Андреевич (корр.), дфмн, доц., нс, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН), 634055, г. Томск, пр-т Академический, д. 2/4; e-mail: pavel@ispms.ru; ORCID: 0000-0002-1879-9143

Батуев Станислав Павлович, кфмн, нс, ИФПМ СО РАН; e-mail: batuev@ispms.ru; ORCID: 0000-0002-8142-7385

Радченко Андрей Васильевич, дфмн, проф., внс, ИФПМ СО РАН; e-mail: andrey-radchenko@live.ru; ORCID: 0000-0002-3105-471X

Research article

Influence of a bimetallic shell and rotation on the interaction of a striker with a metal-ceramic semi-infinite barrier

P.A. Radchenko^{1,2}, S.P. Batuev^{1,2}, A.V. Radchenko^{1,2}

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation

The high-velocity impact of a striker, composed of a high-strength steel core, a lead filler and a brass shell, on metal-ceramic and monolithic metal barriers is numerically modelled. The metal-ceramic barrier is a two-layer structure, with the upper layer made of boron carbide (B₄C) ceramics and the lower layer made of aluminum. The monolithic barrier consists entirely of aluminum. The interaction angles between the striker's longitudinal axis and the normal to the barrier, ranging from 0 to 45 degrees, are considered. The

influence of the bimetallic shell and the striker's rotation around its longitudinal axis on its interaction with a barrier is investigated. The behavior of metallic materials and B₄C ceramics is described using an elastic-plastic model. The fracture criterion for metallic materials is defined by a plastic strain limit. For ceramics, a deformation criterion is applied, considering both compressive and tensile strengths. The modeling is performed within a three-dimensional finite element framework using the EFES 2.0 software, which is capable of simulating body fragmentation, formation of new contact and free surfaces, and material erosion. The full-scale experimental data are in good agreement with the computational results, which confirms the adequacy of the mathematical model and numerical algorithm. The numerical method permits a parametric study of the influence of kinematic, geometric and structural factors on the interaction process. It is shown that the bimetallic shell and the striker's rotation have a significant effect on its interaction with the metal-ceramic barrier.

Keywords: striker, shell, core, ceramics, fracture, modeling, ricochet, crater depth

Received: 20.09.2024 / *Published online:* 10.04.2025

References

1. *Iremonger M.J., Hazell P.J.* Influence on small arms bullet construction on terminal ballistics. Proceedings of the 21st International Symposium on Ballistics / ed. by N. Burman, J. Anderson, G. Katselis. Adelaide, Australia, 2004. P. 767–773.
2. *Crouch I.G., Appleby-Thomas G., Hazell P.J.* A study of the penetration behaviour of mild-steel-cored ammunition against boron carbide ceramic armours. *International Journal of Impact Engineering*. 2015. Vol. 80. P. 203–211. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.03.002
3. *Hazell P.J., Appleby-Thomas G.J., Philbey D., Tolman W.* The effect of gilding jacket material on the penetration mechanics of a 7.62 mm armour-piercing projectile. *International Journal of Impact Engineering*. 2013. Vol. 54. P. 11–18. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.10.013
4. *Forrestal M.J., Børvik T., Warren T.L.* Perforation of 7075-T651 Aluminum Armor Plates with 7.62 mm APM2 Bullets. *Experimental Mechanics*. 2010. Vol. 50, no. 8. P. 1245–1251. DOI: 10.1007/S11340-009-9328-4
5. *Roberts A., Appleby-Thomas G.J., Wood D.C., Hameed A., Crouch I.G.* Dynamic jacket removal and the 'bullet's journey'. Proceedings of the 29th International Symposium on Ballistics / ed. by C. Woodley, I. Cullis. Edinburgh, United Kingdom, 2016. P. 2307–2315.
6. *Gooch W.A., Burkins M.S., Kingman P., Hauver G., Netherwood P., Benck R.* Dynamic X-ray imaging of 7.62-mm APM2 projectiles penetrating boron carbide. Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics. Vol. 2 / ed. by W. Reinicke. San Antonio, Texas, USA, 1999. P. 901–908.
7. *Rosenberg Z., Yeshurun Y., Tsaliah J.* More on the thick-backing screening technique for ceramic tiles against AP projectiles. Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics. San Antonio, Texas: American Defense Preparedness Association, 1990. P. 197–201.
8. *Cosquer Y., Longère P., Pantalé O., Gailhac C.* Experiment/simulation correlation-based methodology for metallic ballistic protection solutions. *Defence Technology*. 2023. Vol. 29. P. 24–38. DOI: 10.1016/j.dt.2023.03.006
9. *Binar T., Švarc J., Vyroubal P., Kazda T., Rolc S., Dvořák A.* The comparison of numerical simulation of projectile interaction with transparent armour glass for buildings and vehicles. *Engineering Failure Analysis*. 2018. Vol. 92. P. 121–139. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.05.009
10. *Fras T.* On the effect of pitch and yaw angles in oblique impacts of small-caliber projectiles. *Defence Technology*. 2024. Vol. 31. P. 73–94. DOI: 10.1016/j.dt.2023.06.004
11. *Pavlovic A., Fragassa C.* Investigating the resistance of reinforced barriers to high velocity projectiles. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 174. P. 384–395. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.074
12. *Kraus A.E., Kraus E.I., Shabalin I.I.* Impact resistance of ceramics in a numerical experiment. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2020. Vol. 61, no. 5. P. 847–854. DOI: 10.1134/S002189442005020X
13. *Holmquist T.J., Johnson G.R.* Response of boron carbide subjected to high-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. P. 742–752. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.08.003
14. *Fernández-Fdz D., Zaera R., Fernández-Sáez J.* A constitutive equation for ceramic materials used in lightweight armors. *Computers & Structures*. 2011. Vol. 89, no. 23/24. P. 2316–2324. DOI: 10.1016/j.compstruc.2011.08.003
15. *Grady D.E.* Hugoniot equation of state and dynamic strength of boron carbide. *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 117. 165904. DOI: 10.1063/1.4918604
16. *Molodets A.M., Golyshv A.A., Shakhrai D.V.* Equations of state and melting curve of boron carbide in the high-pressure range of shock compression. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2017. Vol. 124, no. 3. P. 469–475. DOI: 10.1134/S1063776117030049
17. *Savinykh A.S., Cherepanov I.A., Razorenov S.V., Ovsienko A.I., Rumyantsev V.I., Ordan'yan S.S.* Evolution of Shock Waves in Hot-Pressed Ceramics of Boron Carbide and Silicon Carbide. *Technical Physics*. 2018. Vol. 63, no. 12. P. 1755–1761. DOI: 10.1134/S1063784218120186
18. *Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Rumyantsev V.I.* Dynamic strength of reaction-sintered boron carbide ceramic. *Technical Physics*. 2015. Vol. 60, no. 6. P. 863–868. DOI: 10.1134/S1063784215060249
19. *Krafft J.M.* Surface Friction in Ballistic Penetration. *Journal of Applied Physics*. 1955. Vol. 26, no. 10. P. 1248–1253. DOI: 10.1063/1.1721884

20. *Goldsmith W.* Non-ideal projectile impact on targets. *International Journal of Impact Engineering*. 1999. Vol. 22. P. 95–395. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00031-1
21. *Radchenko P.A., Batuev S.P., Radchenko A.V.* Effect of Projectile Rotation on High-Velocity Impact Fracture. *Physical Mesomechanics*. 2022. Vol. 25. P. 119–128. DOI: 10.1134/S1029959922020035
22. *Radchenko P.A., Radchenko A.V., Batuev S.P.* A numerical study of the high-velocity interaction of rotating strikers having different head shapes with a barrier of finite thickness. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2024. No. 87. P. 120–134. DOI: 10.17223/19988621/87/10
23. *Kanel' G.I., Shcherban' V.V.* Plastic deformation and cleavage rupture of armco iron in a shock wave. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1980. Vol. 16. P. 439–446. DOI: 10.1007/BF00742994
24. *Sedov L.I.* *Mekhanika sploshnoy sredy*. Vol. 2. Moscow: Nauka, 1970. 568 p.
25. *Moynihan T.J., Chou S.-C., Mihalcin A.L.* Application of the Depth-of-Penetration Test Methodology to Characterize Ceramics for Personnel Protection. *Army Research Laboratory*. ARL-TR-2219. 2000. 43 p.
26. *Carton E.P., Johnsen B.B., Rahbek D.-B., Broos H., Snippe A.* Round robin using the depth of penetration test method on an armour grade alumina. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15, no. 6. P. 829–836. DOI: 10.1016/j.dt.2019.07.014
27. *Rosenberg Z., Bless S., Yeshurun Y., Okajima K.* A new definition of ballistic efficiency of brittle materials based on the use of thick backing plates. *Proceedings of the "IMPACT 87" Symposium. Impact loading and dynamic behavior of materials / ed. by C. Chiem, H.-D. Kunze, L. Meyer. DCM Informationsgesellschaft Verlag, 1988. P. 491–498.*
28. *Rozenberg Z., Yeshurun Y.* The relation between ballastic efficiency and compressive strength of ceramic tiles. *International Journal of Impact Engineering*. 1988. Vol. 7, no. 3. P. 357–362. DOI: 10.1016/0734-743X(88)90035-8
29. *Cui F., Wu G., Ma T., Li W.* Effect of Ceramic Properties and Depth-of-penetration Test Parameters on the Ballistic Performance of Armour Ceramics. *Defence Science Journal*. 2017. Vol. 67, no. 3. P. 260–268. DOI: 10.14429/DSJ.67.10664
30. *Franzen R.R., Orphal D.L., Anderson C.E.* The influence of experimental design on depth-of-penetration (DOP) test results and derived ballistic efficiencies. *International Journal of Impact Engineering*. 1997. Vol. 19, no. 8. P. 727–737. DOI: 10.1016/S0734-743X(97)00010-9
31. *Woodward R.L., Baxter B.J.* Ballistic evaluation of ceramics: Influence of test conditions. *International Journal of Impact Engineering*. 1994. Vol. 15, no. 2. P. 119–124. DOI: 10.1016/S0734-743X(05)80024-7
32. *Rosenberg Z., Dekel E.* *Terminal Ballistics*. Springer International Publishing, 2020. 420 p.
33. *Hazell P.J.* Measuring the strength of brittle materials by depth-of-penetration testing. *Advances in Applied Ceramics*. 2010. Vol. 109, no. 8. P. 504–510. DOI: 10.1179/174367610X12804792635387
34. *Venkatesan J., Iqbal M.A., Madhu V.* Ballistic Performance of Bilayer Alumina/Aluminium and Silicon Carbide/Aluminium Armours. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 173. P. 671–678. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.141
35. *Corriveau D., Petre C.F.* Influence of chamber misalignment on cased telescoped (CT) ammunition accuracy. *Defence Technology*. 2016. Vol. 12, no. 2. P. 117–123. DOI: 10.1016/j.dt.2015.11.008