

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-3-414-425

ИССЛЕДОВАНИЕ СОУДАРЕНИЯ УДАРНИКА ИЗ ПОРИСТОГО ВОЛЬФРАМА С КОМБИНИРОВАННОЙ ПРЕГРАДОЙ*

© 2023 г.

Герасимов С.И.^{1,2,3}, Калмыков А.П.¹,
Иоилов А.Г.^{1,2}, Кузьмин В.А.^{1,2}, Маскайкин С.А.¹

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация

²Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Саров, Российская Федерация

³Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», Нижний Новгород, Российская Федерация

s.i.gerasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2023

При высокоскоростном проникании (со скоростями более 2000 м/с) длина каверны от пористого ударника больше, чем от равного ему по размерам и плотности ударника из монолитного (сплошного) материала. Но при этом каверна уже, так что объемы каверн практически одинаковы. Процесс срабатывания (уменьшения длины) и проникания ударников (пористого и монолитного) в течение длительного времени происходит практически одинаково и лишь на последней стадии проникания и особенно в фазе последействия (после полного срабатывания ударника) возникает отличие. Это объясняется тем, что в процессе движения пористого ударника из-за схлопывания пор происходит увеличение его плотности, так что плотность пористого ударника становится больше, чем плотность монолитного ударника. Тогда в случае ограниченной толщины преграды преимущество пористого ударника по глубине проникания может просто не успеть проявиться. Для подтверждения этого предположения представлены результаты опытов.

Представлены результаты экспериментов по соударению ударника из пористого вольфрама с комбинированной преградой, состоящей из пластины из стали и полиэтилена, проведен анализ результатов. Решена задача численного моделирования вышеуказанного эксперимента бессеточным лагранжевым методом моделирования сплошной среды. Приведены расчетная модель, результаты численного моделирования и сравнительный анализ результатов эксперимента и численного моделирования. При скорости внедрения 1920 м/с пористый ударник на 2,8% меньше срабатывается при пробитии прочной стальной преграды, но в малопрочной полиэтиленовой преграде коэффициент

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-19-00613).

срабатывания у пористого ударника выше на 170% относительно стального. Кроме того, стальной ударник после пробития преграды (в воздухе) не разрушается, в отличие от пористого ударника, что также может быть следствием малой прочности последнего.

Ключевые слова: высокоскоростное деформирование, рентгенография, пористый вольфрам, бессеточный метод моделирования Лагранжа.

Введение

Исследование высокоскоростного деформирования и разрушения конструкционных материалов является актуальным [1–10]. В частности, интерес вызывают влияние пористости на величину срабатывания пористого ударника, а также физические эффекты, сопровождающие процесс проникания ударника в преграду. Ниже представлены новые результаты исследования пробития преград пористыми ударниками. Пробивные свойства этих ударников сравниваются с пробивными свойствами монолитных ударников из стали тех же размеров и плотности.

Как показано в ряде расчетных исследований, пористые ударники проникают в прочную преграду глубже, чем монолитные (см., например, [7]). Отмечено, что при высокоскоростном проникании ($V > 2000$ м/с) длина каверны от пористого медного ударника примерно на 35% больше, чем от равного ему по размерам и плотности монолитного стального ударника. Но при этом каверна уже, так что объем каверн одинаков.

Анализ этих явлений, а также проведенные в настоящей статье расчеты показывают, что процесс срабатывания и проникания ударников (пористого и монолитного) в течение длительного времени происходит практически одинаково и лишь на последней стадии проникания и особенно в фазе последействия (после полного срабатывания ударника) возникает отличие. По-видимому, это объясняется тем, что в процессе движения пористого ударника из-за схлопывания пор происходит увеличение плотности, так что плотность пористого ударника становится больше, чем плотность монолитного ударника. Это обстоятельство и приводит к увеличению глубины проникания. Из сказанного следует, что в случае ограниченной толщины преграды преимущество пористого ударника по глубине проникания может просто не успеть проявиться.

Цель настоящей статьи – проверка и подтверждение теоретических предпосылок.

1. Постановка и результаты эксперимента

Опыты проводились в обращенной постановке, при которой в неподвижный, подвешенный на тонких нитях ударник выстреливалась преграда.

В качестве ударников использовались цилиндры из пористого вольфрама (пористость 55%) (рис. 1а). Вольфрамовый ударник изготавливался методом прессования из мелкозернистого порошка вольфрама с добавлением легирующих компонентов – никеля и меди – и последующей обработкой на токарном станке. Состав порошка: 92,32% вольфрам, 1,28% никель, 6,4% медь.

Вольфрамовый ударник имел следующие физико-механические характеристики: плотность $\rho_0 = 7890$ кг/м³, плотность матрицы $\rho_{00} = 17700$ кг/м³, статический предел прочности на сжатие $\sigma_B^T = 89–91$ МПа, статический предел текучести $\sigma_{0,2} = 54–57$ МПа, пористость $\Pi = 1 - \rho_0/\rho_{00} = 0,55$.

Плотность пористого вольфрама выбрана не случайно – это соответствует плотности стали. Такая постановка необходима для дальнейшего сравнения эффективности пробивания одной и той же преграды из сплошного и пористого материала.

Ударник в сборе с алюминиевым стержнем (сплав Д16) подвешивался на раме (рис. 1б). На рисунке обозначено: 1 – алюминиевый стержень, 2 – ударник, 3 – нити для подвешивания на раме, 4 – проволочный датчик для запуска рентгеновского аппарата.

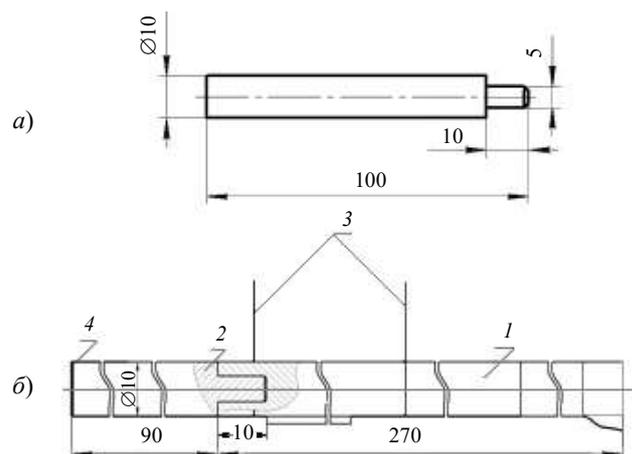


Рис. 1. Конструкция ударника: а – цилиндрический ударник из пористого вольфрама; б – ударник в сборе с алюминиевым стержнем

В процессе пробивания осуществлялось рентгенографирование. Для запуска рентгеновского аппарата использовался проволочный датчик, закрепленный с помощью клейкой ленты на переднем торце ударника.

Преграда представляла собой стальную пластину из стали Ст3 толщиной 25 мм, диаметром 98 мм с полиэтиленовой хвостовой частью длиной 114 мм, толщина пробиваемого полиэтилена составляла 29 мм.

Физико-механические характеристики стали Ст3: плотность $\rho_0 = 7850 \text{ кг/м}^3$, модуль сдвига $G = 81 \text{ ГПа}$, динамический предел текучести $\sigma_T^d = 0,86 \text{ ГПа}$ [11]. Физико-механические характеристики полиэтилена марки 15303-003 [12]: плотность $\rho_0 = 920 \text{ кг/м}^3$, статический предел текучести $\sigma_{0,2} = 9,8 \text{ МПа}$ [13], модуль упругости $E = 0,2 \text{ ГПа}$, скорость звука в материале $c_0 = 2,87 \text{ км/с}$ [14]. Физико-механические характеристики алюминиевого сплава Д16 [15]: плотность $\rho_0 = 2800 \text{ кг/м}^3$ [13], модуль упругости $E = 7000 \text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,31$.

Скорость преграды в экспериментах определялась массой порохового заряда. Преграда разгонялась с использованием пороховой баллистической установки до скоростей 1830–2000 м/с. Разброс в скоростях преграды определяется точностью воспроизведения режима выстрела пороховой баллистической установки. При одной и той же массе порохового заряда возможны отличия в скоростях метаемого объекта. Для отсечения пороховых газов после выстрела использовался отсекаТЕЛЬ в виде плиты с отверстием. Скорость полета мишени определялась с помощью контактных датчиков. Ударник центрировался по оси мишени с помощью лазерного прицела.

Преграда представляла собой двухслойную конструкцию, показанную на рис. 2.

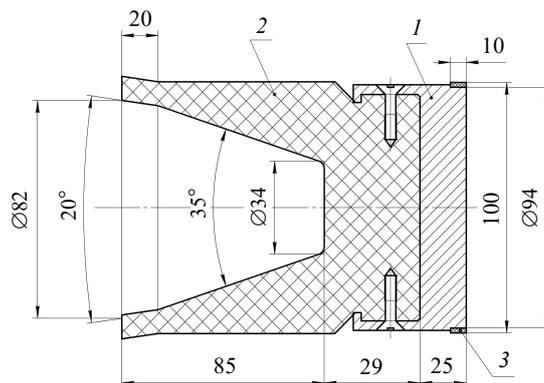


Рис. 2. Конструкция преграды: 1 – пластина (материал Ст3),
2 – хвостовик (материал полиэтилен), 3 – датчик

Общий вид ударника, размещенного на фоне кассеты с рентгеновской пленкой, показан на рис. 3.

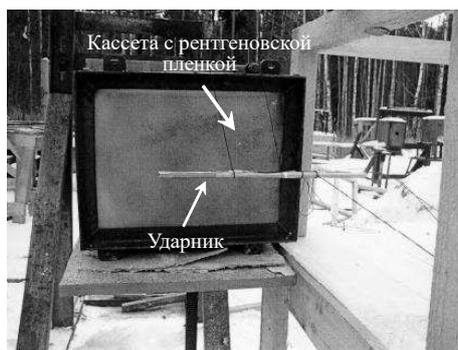


Рис. 3. Вид ударника

В результате проведенных экспериментов было зафиксировано следующее. Ударник из пористого вольфрама деформировался в гидродинамическом режиме и, как показало рентгенографирование, продолжал разрушаться в воздухе. При пробитии стальной пластины комбинированной преграды коэффициент срабатывания (укорочения) ударника из пористого вольфрама составил $K_{ср} = 1,4$. Коэффициент срабатывания определяется соотношением $K_{ср} = \Delta L/h$, где ΔL – укорочение ударника, h – толщина преграды.

Результаты измерений (опыт 1):

- скорость мишени 1982 м/с,
- толщина стали 25 мм,
- суммарное укорочение ударника после пробития комбинированной преграды 48,2 мм,
- укорочение ударника после пробития стальной пластины 34,9 мм.

2. Численное моделирование

Задача соударения решалась в пакете программ ЛОГОС методом «сглаженных частиц» (smooth particle hydro-dynamics) SPH [16, 17]. Метод SPH является бес-

сеточным лагранжевым методом моделирования сплошной среды для численного решения нестационарных задач динамики сплошной среды с большими уровнями деформаций, разрушений, фрагментации. В этом методе сплошная среда представляется в виде набора частиц, как правило, фиксированной массы в конкретной расчетной области задачи. При этом полагается, что полевые (гидродинамические, упругопластические) характеристики материала частицы (плотность, давление, напряжения, энергия, скорость) распределены симметрично относительно центра частицы i по некоторому задаваемому аналитическому закону $W = W(\Delta r_{ij}, h)$, называемому функцией распределения, весовой функцией или интерполяционным ядром. Здесь h – параметр (размер) интерполяционного ядра, близкий к диаметру частицы; Δr_{ij} – расстояние между частицами-соседями i и j .

Решение осуществлялось в двухмерной осесимметричной постановке. Схема расчетной модели для задачи численного моделирования приведена на рис. 4.

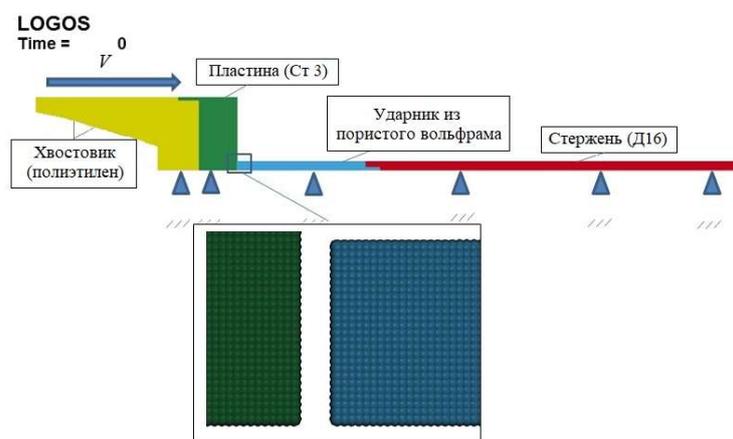


Рис. 4. Схема расчетной модели

Деформирование материалов составных частей конструкции мишени и ударника описывалось изотропной упругопластической моделью.

Сжимаемость среды под действием внешних сил определяется шаровой составляющей тензора напряжений и связанным с ней уравнением состояния (УРС), а изменение формы – девиатором тензора напряжений.

Напряженно-деформированное состояние описывается уравнением:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + s_{ij}, \quad (1)$$

$$p = p(\rho, e), \quad (2)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений; s_{ij} – девиатор тензора напряжений; δ_{ij} – символ Кронекера; p – давление, заданное УРС; ρ , e – плотность и удельная внутренняя энергия вещества.

В области упругих деформаций поведение материала описывается законом Гука:

$$s_{ij} = 2G\varepsilon_{ij}, \quad p = -K \frac{\Delta V}{V}, \quad (3)$$

где $G = E/(2(1 + \nu))$ – модуль сдвига, ε_{ij} – девиатор тензора деформаций, E – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, $K = E/(3(1 - 2\nu))$ – модуль объемного сжатия, $\Delta V/V$ – объемная деформация.

В пластической области деформирования девиатор тензора напряжений соответствует поверхности текучести Мизеса:

$$\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} - \sigma_s^2 \leq 0, \quad (4)$$

где σ_s – напряжение текучести.

Для моделирования деформирования стержня (Д16) принималась упругая модель деформирования, так как стержень практически не воспринимает нагрузку от удара. Для описания деформирования хвостовика (из полиэтилена) применялась модель сдвиговой прочности Джонсона – Кука.

В соответствии с этой моделью предел текучести σ_s является функцией трех переменных: эффективной пластической деформации ε_p , интенсивности скоростей пластических деформаций $\dot{\varepsilon}_p$ и температуры T :

$$\sigma_s(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = \begin{cases} (A + B(\varepsilon_p)^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), & \dot{\varepsilon}_p > \dot{\varepsilon}_0, \\ (A + B(\varepsilon_p)^n) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), & \dot{\varepsilon}_p \leq \dot{\varepsilon}_0, \end{cases} \quad (5)$$

где $A = \sigma_{s0}$ – статический предел текучести при нормальных условиях (при начальной (комнатной) температуре T_r); B , n – константы деформационного упрочнения; C – константа скоростного упрочнения; $\dot{\varepsilon}_0$ – нормировочное значение скорости деформирования (обычно $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$); T_m – температура плавления (обычно температуры задаются по шкале Кельвина). Параметры модели деформирования полиэтилена [18]: $A = 42,7 \text{ МПа}$; $B = 8,3 \text{ МПа}$; $C = 0,04$; $n = 0,4$; $m = 1$; $T_r = 293 \text{ К}$; $T_m = 407 \text{ К}$.

Для описания деформирования стальной пластины (Ст3) и ударника из пористого вольфрама была принята упругопластическая гидродинамическая модель, поверхность текучести которой определяется выражением:

$$\sigma_s = \sigma_0 + E_h \varepsilon_p, \quad (6)$$

где σ_s – напряжение текучести, σ_0 – начальный предел текучести, E_h – модуль пластического упрочнения, ε_p – эффективная пластическая деформация. Параметры модели деформирования стали и вольфрама представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры модели деформирования стали и пористого вольфрама

Параметр	Модуль объемного сжатия K , МПа	Модуль сдвига G , МПа	Начальный предел текучести σ_0 , МПа	Модуль пластического упрочнения E_h , МПа
Сталь 3 (пластина)	175500	81000	860	0
Пористый вольфрам (ударник)	126240	160000	570	10

Для моделирования сжимаемости материалов хвостовика (полиэтилен), пластины (Ст3) использовалось УРС в форме Грюнайзена, определяемое выражениями:

а) давление на адиабате сжатия

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \mu [1 + (1 + \Gamma_0 / 2) \mu]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1)} + \Gamma_0 \rho_0 e, \quad (7)$$

б) давление на адиабате расширения

$$P = \rho_0 c_0^2 \mu + \Gamma_0 \rho_0 e, \quad (8)$$

где P – давление; ρ_0, ρ – начальная и текущая плотность материала; c_0, S_1, S_2 – константы ударной адиабаты, соответствующие аналитическому выражению зависимости скорости ударной волны D от массовой скорости u ; e – удельная внутренняя энергия; Γ_0 – коэффициент Грюнайзена, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$.

Параметры УРС полиэтилена и стали подобраны в соответствии с экспериментальными данными по ударному сжатию [19] и приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры уравнения состояния

Параметр	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Скорость звука c_0 , км/с	Коэффициент Грюнайзена Γ_0	S_1	S_2
Полиэтилен (хвостовик)	920	2,566	0,7	1,714	0,0273
Ст3 (пластина)	7850	3,701	1,68	1,87	0,076

Уравнение состояния для пористого вольфрама задавалось в форме Ми–Грюнайзена (УРС Зельдовича) [20, 21]:

$$p = p_x(\delta) + p_T(\delta, T) = p_x(\delta) + \Gamma_0 \rho (e - e_x(\delta)),$$

где $p_x(\delta)$ и $e_x(\delta)$ – потенциальные составляющие давления и удельной энергии; $\delta = \rho/\rho_0$ – относительное сжатие; ρ_0 – плотность вещества при нормальных условиях; T – температура; $p_T(\delta, T)$ – тепловая составляющая давления.

Потенциальное давление определяется функцией:

$$p_x = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1).$$

Потенциальная энергия рассчитывается по формуле:

$$e_x(\delta) = \frac{c_0^2}{n} \left(\frac{1}{n-1} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{n-1} + \frac{\rho_0}{\rho} \right) - \frac{c_0^2}{n-1}.$$

Параметры используемого уравнения состояния в форме Ми–Грюнайзена (УРС Зельдовича) для пористого вольфрама [22, 23]: скорость звука в сплошном несжатом холодном веществе $c_0 = 4,0$ км/с; коэффициент Грюнайзена $\Gamma_0 = 2,1$; $n = 4$; плотность вещества при нормальных условиях $\rho_0 = 7890$ кг/м³.

В качестве критерия разрушения для стали Ст3 и для пористого вольфрама задавалось откольное давление, равное соответственно $P = -1700$ МПа, $P = -1360$ МПа. Для описания разрушения хвостовика (полиэтилен) использовался критерий разрушения по максимальной пластической деформации $\varepsilon_p^{\max} = 0,91$.

В результате проведенного численного расчета получена картина деформирования ударника (рис. 5).

Для сравнения на рис. 6 приведена рентгенограмма пробития этой же преграды аналогичным по размерам монолитным ударником при скорости $V = 1953$ м/с.

Стальной монолитный ударник разрушается не только в стальной, но и в полиэтиленовой преграде. Разрушение стального ударника прекращается при выходе в воздух. Необходимо отметить, что пористый ударник продолжает разрушаться и в воздухе.

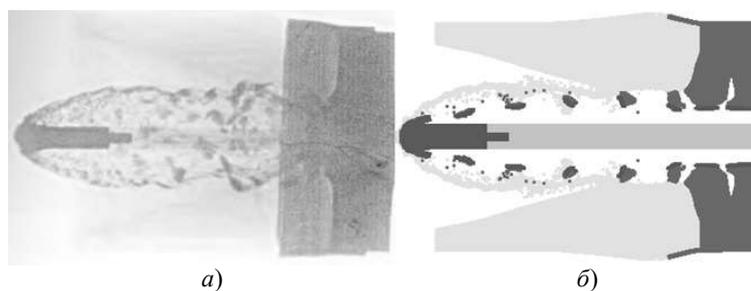


Рис. 5. Деформирование ударника ($V = 1982$ м/с) в момент времени 102 мкс: a – рентгенограмма, b – расчет

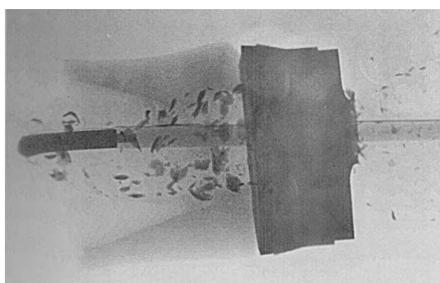


Рис. 6. Рентгенограмма стального ударника в момент 100 мкс

Заключение

При пробитии стальных преград при скоростях 1830–2000 м/с коэффициент срабатывания (укорочения) ударников из пористого вольфрама составил $K_{\text{ср}} = 1,4$, который примерно равен коэффициенту укорочения сплошного стального ударника тех же размеров и плотности.

Разрушение пористого ударника интенсивно продолжается после пробития стального слоя в полиэтилене и продолжается в воздухе.

Согласно расчету, укорочение пористого ударника составило 51,7 мм, разница с экспериментальным значением составляет 7,3%.

Список литературы

1. Trucano T.G., Grady D.E. Impact shock and penetration fragmentation in porous media. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 17. Iss. 4–6. P. 861–872. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99906-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99906-8).
2. Piekutowski A.J., Poormon K.L., Christiansen E.L., Davis B.A. Performance of Whipple shields at impact velocities above 9 km/s. *International Journal of Impact Engineering*. 2011. Vol. 38. Iss. 6. P. 495–503. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.021.
3. Backman M.E., Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*. 1978. Vol. 16. Iss. 1. P. 1–99. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90002-2).
4. Линник Е.Ю., Котов В.Л., Константинов А.Ю. Сравнительный анализ сил сопротивления внедрению конических и пирамидальных тел в упругопластическую среду. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №3. С. 338–347. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-3-338-347>.
5. Piekutowski A.J., Poormon K.L. Effects of scale on the performance of Whipple shields for impact velocities ranging from 7 to 10 km/s. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 58. P. 642–652. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.074.

6. Dubinsky A.V. Explicit formula for depth of penetration of cone-nosed impactor into anisotropic shields. *Проблемы прочности и пластичности*. 2020. Т. 82. №1. С. 100–106. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-1-100-106>.
7. Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперсверхзвуковом взаимодействии. *ЖТФ*. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 131–134.
8. Казаков Ю.С., Тарлаковский Д.В. Учет трения на начальном этапе вертикального внедрения выпуклого ударника в упругую полуплоскость. *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. №2. С. 225–235. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-84-2-225-235>.
9. Мелехин Н.В., Болдин М.С., Попов А.А. и др. Исследование влияния внутренних напряжений на баллистическую стойкость мелкозернистого оксида алюминия, полученного методом электроимпульсного плазменного спекания. *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. №2. С. 272–281. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-84-2-272-281>.
10. Senden T.J., Knackstedt M.A., Lyne M.B. Droplet penetration into porous networks: Role of pore morphology. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2000. Vol. 15. Iss. 5. P. 554–563. <https://doi.org/10.3183/npprj-2000-15-05-p554-563>.
11. *Физика взрыва*. Под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
12. *ГОСТ 16337-77. Полиэтилен высокого давления. Технические условия*. М.: Стандартинформ, 2008. 36 с.
13. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Бартковский А.М. и др. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. *Физические величины: Справочник*. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
14. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. *Справочник по сопротивлению материалов*. Киев: Наукова Думка, 1988. 736 с.
15. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. *Конструкционные материалы: Справочник*. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
16. Дьянов Д.Ю., Казанцев А.В., Морозов С.В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц. *Супервычисления и математическое моделирование: Труды XV Международ. семинара*. Саров. 2014. С. 212–220.
17. Дьянов Д.Ю., Казанцев А.В., Челаков А.А. Пакет программ ЛОГОС. Использование метода сглаженных частиц при решении задач высокоскоростного динамического деформирования. *Суперкомпьютерное моделирование и искусственный интеллект: Сб. науч. трудов Международ. конф. XXII «Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров. 2021. С. 142–154.
18. Шумихин Т.А. Фрагментация ударника при высокоскоростном пробитии тонких дискретных преград. *Автореф. дисс... канд. техн. наук*. Москва, 2013. 26 с.
19. Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В. *Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ*. Под ред. Р.Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2006. 530 с.
20. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Физматлит, 2008. 656 с.
21. Забабахин Е.И. *Некоторые вопросы газодинамики взрыва*. Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 1997. 204 с.
22. Воропинов А.И., Ильяева Л.А., Подурец М.А. и др. Ударные адиабаты пористых алюминия, титана, меди и вольфрама и адиабаты Пуассона пористых меди и вольфрама в области неполного закрытия пор. Термодинамическая модель и эксперимент. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Теоретическая и прикладная физика*. 2005. №1-2. С. 45–50. <https://rucont.ru/efd/559421>.
23. Nor M.K.M., Ho C.S., Maat N., Kamarulzaman M.F. Modelling shock waves in composite materials using generalised orthotropic pressure. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2020. Vol. 32. P. 1217–1229. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00835-6>.

References

1. Trucano T.G., Grady D.E. Impact shock and penetration fragmentation in porous media. *Int. J. Impact Eng.* 1995. Vol. 17. Iss. 4–6. P. 861–872. [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(95\)99906-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(95)99906-8).

2. Piekutowski A.J., Poormon K.L., Christiansen E.L., Davis B.A. Performance of Whipple shields at impact velocities above 9 km/s. *Int. J. Imp. Eng.* 2011. Vol. 38. Iss. 6. P. 495–503. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.021.
3. Backman M.E., Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *Int. J. Eng. Sci.* 1978. Vol. 16. Iss. 1. P. 1–99. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(78\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0020-7225(78)90002-2).
4. Linnik E.Yu., Kotov V.L., Konstantinov A.Yu. Sravnitelnyy analiz sil soprotivleniya vnedreniyu konicheskikh i piramidalnykh tel v uprugoplasticheskuyu sredu [Comparative analysis of resistance to the introduction of conical and pyramidal bodies to the elastic plastic environment]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 3. P. 338–347 (In Russian).
5. Piekutowski A.J., Poormon K.L. Effects of scale on the performance of Whipple shields for impact velocities ranging from 7 to 10 km/s. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 58. P. 642–652. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.05.074.
6. Dubinsky A.V. Explicit formula for depth of penetration of cone-nosed impactor into anisotropic shields. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2020. Vol. 82. No 1. P. 100–106. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2020-82-1-100-106>.
7. Fedorov S.V. K opredeleniyu glubiny pronikaniya poristykh udarnikov pri giperskorostnom vzaimodeystvii [To determine the penetration depth of porous impactors under hypersonic interaction]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics]*. 2007. Vol. 77. Iss. 10. P. 131–134 (In Russian).
8. Kazakov Yu.S., Tarlakovskii D.V. Uchet treniya na nachalnom etape vertikalnogo vnedreniya vypuklogo udarnika v upruguyu poluploskost [Taking account of friction at the initial stage of indentation of convex punch into elastic half-plane]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2022. Vol. 84. No 2. P. 225–235 (In Russian).
9. Melekhin N.V., Boldin M.S., Popov A.A. et al. Issledovanie vliyaniya vnutrennikh napryazheniy na ballisticheskuyu stoykost melkozernistogo oksida alyuminiya, poluchennogo metodom elektroimpulsnogo plazmennogo spekaniya [Investigation of the effect of internal stresses on the ballistic resistance of fine-grained aluminum oxide obtained by spark plasma sintering]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2022. Vol. 84. No 2. P. 272–281 (In Russian).
10. Senden T.J., Knackstedt M.A., Lyne M.B. Droplet penetration into porous networks: Role of pore morphology. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 2000. Vol. 15. Iss. 5. P. 554–563. <https://doi.org/10.3183/nprj-2000-15-05-p554-563>.
11. *Fizika vzryva [Physics of Explosion]*. Ed. L.P. Orlenko. In 2 vols. Vol. 2. Moscow. Fizmatlit Publ. 2004. 656 p. (In Russian).
12. *GOST 16337-77. Polietilen vysokogo davleniya. Tekhnicheskie usloviya [GOST 16337-77. High-Pressure Polyethylene. Specifications]*. Moscow. Standartinform Publ. 2008. 36 p. (In Russian).
13. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bartkovskiy A.M. et al. Eds. I.S. Grigoryev, E.Z. Meylikhov. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical Quantities: Handbook]*. Moscow. Energoatomizdat Publ. 1991. 1232 p. (In Russian).
14. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Handbook of Strength of Materials]*. Kiev. Naukova Dumka Publ. 1988. 736 p. (In Russian).
15. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. et al. *Konstruksionnye materialy: Spravochnik [Structural Materials: Handbook]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1990. 688 p. (In Russian).
16. Dyanov D.Yu., Kazantsev A.V., Morozov S.V. et al. Paket programm LOGOS. Funktsionalnye vozmozhnosti dlya resheniya svyazannykh zadach prochnosti i gidrodinamiki sglazhennykh chastits [The LOGOS software package. Functional capabilities for solving related problems of strength and hydrodynamics of smoothed particles]. *Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie: Trudy XV Mezhdunarod. seminara [Supercomputations and Mathematical Modeling: Proceedings of the XV International Seminar]*. Sarov. 2014. P. 212–220 (In Russian).
17. Dyanov D.Yu., Kazantsev A.V., Chelakov A.A. Paket programm LOGOS. Ispolzovanie metoda sglazhennykh chastits pri reshenii zadach vysokoskorostnogo dinamicheskogo deformirovaniya [LOGOS software package. The use of the smoothed particle method in solving problems of high-speed dynamic deformation]. *Superkompyuternoe modelirovanie i iskusstvennyy intellekt:*

Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy konferentsii XXII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya [Supercomputer Modeling and Artificial Intelligence: A Collection of Scientific Papers of the International Conference "XXII Kharitonov Thematic Scientific Readings"]. Sarov. 2021. P. 142–154 (In Russian).

18. Shumikhin T.A. Fragmentatsiya udarnika pri vysokoskorostnom probitii tonkikh diskretnykh pregrad [Fragmentation of the drummer during high-speed penetration of thin discrete barriers]. *Avtoferat dissertatsii kand. tekhn. nauk [Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences]*. Moscow. 2013. 26 p. (In Russian).

19. Trunin R.F., Gudarenko L.F., Zhernokletov M.V., Simakov G.V. *Eksperimentalnye dannye po udarno-volnovomu szhatiyu i adiabaticheskomu rasshireniyu kondensirovannykh veshchestv [Experimental Data on Shock-Wave Compression and Adiabatic Expansion of Condensed Substances]*. Ed. R.F. Trunin. Sarov. RFYaTs – VNIIEF Publ. 2006. 530 p. (In Russian)

20. Zeldovich Ya.B., Rayzer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy [Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2008. 656 p. (In Russian).

21. Zababakhin E.I. *Nekotorye voprosy gazodinamiki vzryva [Some Questions of Gas Dynamics of Explosion]*. Snezhinsk. RFYaTs – VNIITF Publ. 1997. 204 p. (In Russian)

22. Voropinov A.I., Ilkaeva L.A., Podurets M.A. i dr. Udarnye adiabaty poristykh alyuminiya, titana, medi i volframa i adiabaty Puassona poristykh medi i volframa v oblasti nepolnogo zakrytiya por. Termodinamicheskaya model i eksperiment [Impact adiabates of porous aluminum, titanium, copper and tungsten and Poisson's adiabates of porous copper and tungsten in the area of incomplete pore closure. Thermodynamic model and experiment]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Teoreticheskaya i prikladnaya fizika [VANT Journal]*. 2005. No 1-2. P. 45–50 (In Russian).

23. Nor M.K.M., Ho C.S., Maat N., Kamarulzaman M.F. Modelling shock waves in composite materials using generalised orthotropic pressure. *Contin. Mech. Thermody.* 2020. Vol. 32. P. 1217–1229. <https://doi.org/10.1007/s00161-019-00835-6>.

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF A POROUS TUNGSTEN IMPACTOR WITH A COMBINED BARRIER*

Gerasimov S.I.^{1,2,3}, Kalmykov A.P.¹, Ioilev A.G.^{1,2},
Kuzmin V.A.^{1,2}, Maskaikin S.A.¹

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russian Federation

²Sarov Physics and Technical Institute of NRNU “MEPHI”, Sarov, Russian Federation

³Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics n.a. A.V. Gaponov-Grekhov of the RAS”, Nizhny Novgorod, Russian Federation

s.i.gerasimov@mail.ru

Received by the Editor 2023/06/01

With high-speed penetration (with velocities more than 2000 m/s), the length of the cavity from a porous striker is greater than from a striker of monolithic (solid) material equal to it in size and density. But at the same time the cavern is narrower, so the volumes of the caverns are almost the same. The process of length reduction and penetration of the strikers (porous and monolithic) for a long time occurs almost identically and only at the last stage of penetration and, especially in the aftereffect phase (after the complete destruction of the striker), there is a difference. This is explained by the fact that during the movement of the porous striker, due to the collapse of the pores, an increase in density occurs, so that the density of the porous striker becomes greater than the density

* The research was funded by the Russian Science Foundation (project No 20-19-00613).

of the solid striker. Then, in the case of a limited thickness of the barrier, the advantage of a porous striker in terms of penetration depth may simply not have time to manifest itself. The results of experiments conducted to confirm this assumption are presented below.

The results of experiments on the collision of a porous tungsten impactor with a combined barrier consisting of a steel and polyethylene plate are presented, and the results are analyzed. The problem of numerical simulation of the above experiment by a mesh-free Lagrangian continuous medium modeling method is solved. The calculation model, the results of numerical modeling and a comparative analysis of the results of the experiment and numerical modeling are presented. At the penetration rate $V \approx 1920$ m/s, the porous striker is 2.8% less destroyed when a strong steel barrier is broken through, but in a low-strength polyethylene barrier, the length reduction coefficient of the porous striker is 170% higher relative to the steel one. In addition, a steel striker after breaking through an obstacle (in the air) it does not collapse, unlike porous, which may also be a consequence of the low strength of the latter.

Keywords: high-speed deformation, radiography, porous tungsten, mesh-free Lagrange modeling method.