

О ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПРОНИКАНИИ СТЕРЖНЕЙ ИЗ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

С.В. Федоров
А.В. Бабкин
В.А. Велданов
Н.А. Гладков
С.В. Ладов

sergfred-64@mail.ru
shef-pk@ya.ru
vevladi@mail.ru
n.a.gladkov@yandex.ru
ladov-sv@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено влияние пористости материала на пробивное действие порошковых кумулятивных струй, формируемых при взрывном обжатии облицовок, спрессованных из металлического порошка. На основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред исследованы особенности проникания удлиненных пористых ударников в стальную преграду в гидродинамическом режиме (скорость взаимодействия — несколько километров в секунду). Установлено, что глубина проникания пористых стержней превышает значение, определяемое на основании гидродинамической теории в предположении модели несжимаемой жидкости. Это превышение связано с изменением механизма проникания пористого ударника, обусловленным формированием в нем присоединенной ударной волны у границы контакта с преградой. Предложена простая модель для прогнозирования пробивного действия удлиненных пористых ударников. На ее основе для глубины проникания пористого стержня получено соотношение, отличающееся от формулы Лаврентьева дополнительным множителем, зависящим от пористости материала

Ключевые слова

Высокоскоростное проникание, порошковая кумулятивная струя, гидродинамический режим, удлиненный ударник, пористый материал, пробивное действие, стальная преграда, присоединенная ударная волна

Поступила в редакцию 24.03.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-08-08319-а)

Для пробития различных преград широко используют кумулятивные заряды [1], представляющие собой цилиндрический или цилиндрикоконический заряд взрывчатого вещества с выемкой на одном из торцов, покрытой тонкой металлической облицовкой. При схлопывании облицовки под действием давления продуктов детонации заряда взрывчатого вещества формируются металлические кумулятивные струи, движущиеся вдоль оси заряда с очень высокой скоростью, возрастающей от хвостовой части струи к головной (скорость головной части кумулятивной струи

может достигать 10 км/с, а скорость хвостовой — 1,5...2,0 км/с). С позиции геометрии и кинематики движения кумулятивную струю можно рассмотреть как градиентный стержень, движущийся с увеличением длины вследствие наличия градиента осевой скорости [2, 3]. Удлинение кумулятивной струи в процессе движения к преграде обеспечивает повышение ее пробивной способности, так как длина струи наряду с плотностью ее материала относится к числу основных факторов, определяющих глубину проникания струи в преграду [4].

Применение в кумулятивных зарядах облицовок, спрессованных из металлического порошка [5, 6], позволяет формировать кумулятивные струи, состоящие из отдельных, не связанных между собой мелкодисперсных частиц. Отсутствие в таких струях при их растяжении прочностных сил исключает развитие пластической неустойчивости с последующим распадом струи на отдельные безградиентные элементы, как это происходит в случае монолитных струй [7]. Способность к неограниченному осевому удлинению кумулятивной струи из порошкового материала дает возможность повысить ее пробивное действие по сравнению с аналогичным действием струи из монолитного материала [8–10]. Однако это потенциальное преимущество порошковых кумулятивных струй, обусловленное их внутренней структурой, может быть дезавуировано вследствие проявления другого эффекта, также связанного со структурой порошковой струи [11, 12]. Отсутствие в порошковой струе внутренних сил, противодействующих ее разуплотнению, может вызвать существенное снижение средней плотности струи и, соответственно, ее проникающей способности [13–15].

Для определения эффективности функционирования кумулятивных зарядов с облицовками из порошкового материала необходимо выяснение особенностей высокоскоростного проникания удлиненных пористых ударников. С учетом этого может быть дан ответ на следующий вопрос: насколько применима для расчета пробивного действия порошковой кумулятивной струи формула Лаврентьева [4], которую используют для определения глубины проникания в преграду удлиненных ударников при достаточно высоких скоростях взаимодействия (когда можно пренебречь прочностными свойствами материалов) и устанавливает пропорциональность глубины проникания длине ударника и квадратному корню из соотношения плотностей материалов ударника и преграды?

Экспериментально и на основе численного моделирования было показано, что пористый ударник из металлических опилок проникает в преграду в гидродинамическом режиме (с растеканием материала ударника по поверхности кратера в преграде в процессе проникания) глубже, чем равный ему по массе и диаметру монолитный [16]. С увеличением степени разуплотнения пористого ударника его пробивное действие по сравнению с действием монолитного ударника возрастает. Однако представленные в работе [16] результаты имеют частный характер и не дают четкого объяснения физических причин обнаруженного эффекта, что в свою очередь не позволяет выйти на какие-либо обобщения относительно характера его проявления в различных условиях. Кроме того,

в работе [16] рассмотрены компактные ударники (длиной, равной диаметру или незначительно превышающей его), что также затрудняет использование представленных результатов применительно к оценке пробивного действия порошковых кумулятивных струй (режимы проникания компактных и удлиненных ударников имеют особенности).

Цель настоящей работы — углубление представлений о механизме проникания удлиненных пористых ударников с возможностью выхода на прогнозирование их пробивного действия. Исследования проведены на основе численного моделирования в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред [17]. Материал преграды рассмотрен как сжимаемая упругопластическая среда с баротропным уравнением состояния в форме Тэта [4]. Модель поведения материала пористого ударника основана на следующем подходе: выборка пор в пористой среде происходит при нулевом давлении, после чего она ведет себя как монолитная и подчиняется уравнению состояния в форме Ми — Грюнайзена [18]. Прочность материала ударника не учитывалась.

Пробивное действие монолитных и пористых ударников в работе [16] сравнивалось при их фиксированных диаметре и массе, поэтому одна из причин большего проникания пористых ударников была связана с увеличением длины ударника по мере его разуплотнения. В настоящей работе для исключения влияния указанного фактора смоделировано проникание геометрически идентичных монолитных и пористых ударников (с одинаковыми диаметрами и длинами). Кроме того, были рассмотрены ударники в форме цилиндрического стержня с достаточно большим удлинением (отношением длины к диаметру), для которых основной вклад в пробитие достигается в стационарном (установившемся) режиме проникания. Это позволило при последующем анализе результатов использовать в качестве базы для сравнения гидродинамическую теорию проникания [4], хорошо описывающую установившуюся стадию высокоскоростного проникания монолитных металлических стержней [19]. Во всех случаях материал преграды — сталь с пределом текучести 400 МПа.

Глубина проникания определялась в момент полного исчерпания длины ударника (приращение глубины на последующей стадии инерционного движения среды относительно невелико и не учитывалось). Зависимость относительной глубины проникания L/l_0 от степени разуплотнения α медных пористых

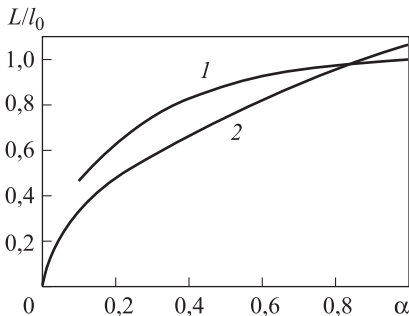


Рис. 1. Зависимость относительной глубины проникания L/l_0 от степени разуплотнения α медных пористых стержней, полученная численным расчетом (1) и на основе гидродинамической теории проникания в предположении несжимаемости материалов (2)

стержней приведена на рис. 1 (L — глубина проникания; l_0 — начальная длина стержня). Степень разуплотнения α (по отношению к монолитному) характеризует пористость материала стержня: $\alpha = \rho_{00p} / \rho_{0p}$, где ρ_{00p} — начальная плотность пористого материала; ρ_{0p} — нормальная плотность монолита. Длина ударников 10 диаметров, скорость взаимодействия $v_0 = 4$ км/с.

Согласно сравнению результатов численного моделирования с прогнозом, сделанным на основе гидродинамической теории проникания в приближении модели несжимаемой жидкости (см. рис. 1), глубина проникания пористых стержней ($\alpha < 1$) превышает рассчитываемое по формуле Лаврентьева значение [4]

$$\frac{L}{l_0} = \sqrt{\frac{\rho_{00p}}{\rho_{0b}}} = \sqrt{\alpha} \sqrt{\frac{\rho_{0p}}{\rho_{0b}}}, \quad (1)$$

где ρ_{0b} — плотность материала преграды. С увеличением степени разуплотнения (уменьшением параметра α) относительное превышение глубины проникания пористого стержня по сравнению с имеющим те же плотность и размеры монолитным стержнем (для которого хорошо применима формула Лаврентьева) возрастает.

Формы каверн в стальной преграде при проникании монолитного алюминиевого и пористого медного ($\alpha = 0,303$) стержней равной плотности и размеров приведены на рис. 2. Каверна, образованная пористым стержнем, существенно ($\approx 35\%$) больше по глубине, но имеет меньший поперечный размер. Объем каверн приблизительно одинаков. Зависимости, подобные зависимостям, приведенным на рис. 1, были получены при моделировании проникания пористых стержней и из других материалов. Таким образом, результаты численного моделирования свидетельствуют об изменении механизма проникания пористых стержней, приводящем к заметным отклонениям глубины их проникания от значения, определяемого по (1). Анализ картины взаимодействия, фиксируемой в численных расчетах, позволяет предположить, что эти отклонения связаны с формированием в пористом стержне в процессе проникания вблизи поверхности контакта с преградой присоединенной ударной волны (УВ) (факт формирования присоединенной УВ в пористом ударнике отмечен и в работе [16]).

Формирование присоединенной УВ в пористом стержне обусловлено низкой скоростью звука в пористом материале (скорости распространения возмущений, связанных с изменением плотности пористого материала вследствие

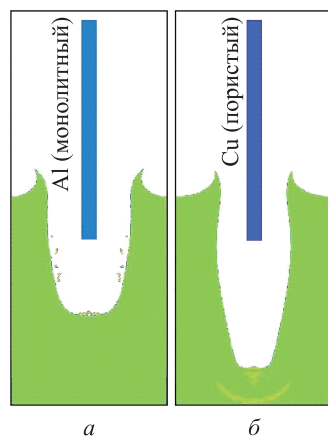


Рис. 2. Формы каверн в стальной преграде при проникании монолитного алюминиевого (а) и пористого медного (б) стержней равной плотности и размеров (скорость взаимодействия 4 км/с)

изменения размеров пор). Согласно данным, приведенным в работе [20], ее значение при объемном содержании воздушных пор в десятки процентов имеет порядок всего лишь десятка метров в секунду. При рассматриваемых скоростях взаимодействия в несколько километров в секунду для пористого стержня должен реализовываться сверхзвуковой режим проникания, предопределяющий наличие в нем присоединенной УВ.

Основываясь на этом предположении и рассматривая процесс проникания как взаимодействие струй жидкости [1, 21, 22], можно построить простую модель проникания пористого стержня (рис. 3), математическое описание которой включает в себя систему соотношений на фронте присоединенной УВ в стержне [23]:

$$p_s = \rho_{00p} u_s D_s; \quad \rho_{00p} D_s = \rho_{sp} (D_s - u_s), \quad (2)$$

где p_s — давление на фронте УВ в стержне; u_s, D_s — массовая скорость материала за фронтом УВ и скорость УВ в стержне (в движущейся со скоростью v_0 системе отсчета, связанной со стержнем); ρ_{sp} — плотность материала стержня, приобретаемая за фронтом УВ.

Рис. 3. Расчетная схема проникания пористого стержня с учетом формирования в нем присоединенной УВ:

- 1 — преграда; 2 — фронт ударной волны; 3 — ударник; 4 — граница контакта

Кроме того, условия непрерывности скорости и давления на поверхности контакта стержня и преграды совместно с уравнениями Бернулли, связывающими параметры состояния на контактном разрыве с параметрами на фронте УВ для стержня и с параметрами на бесконечности для преграды (материал преграды рассматривается как идеальная несжимаемая жидкость с плотностью ρ_{0b}), позволяют записать соотношение

$$0,5\rho_{0b}u_c^2 = 0,5\rho_{sp}(v_0 - u_s - u_c)^2 + p_s, \quad (3)$$

где u_c — скорость границы контакта. При записи уравнения Бернулли для стержня дополнительно предполагалось, что плотность его материала возрастает скачком на фронте УВ от значения ρ_{00p} до значения ρ_{sp} , а далее (на границе контакта) не изменяется. Соотношение (3) выражает равенство давлений в преграде (левая часть соотношения) и в стержне (правая часть) на границе контакта.

Из условия неподвижности фронта УВ в стержне относительно границы контакта следует соотношение

$$u_c = v_0 - D_s. \quad (4)$$

Связь давления p_s и плотности ρ_{sp} на фронте УВ в пористом материале выражают ударной адиабатой Зельдовича — Забабахина [18]:

$$p_s = 2A \frac{\frac{n-\gamma-1}{\gamma(n-1)} \left(\frac{\rho_{sp}}{\rho_{0p}}\right)^n + \frac{n}{n-1} \frac{\rho_{sp}}{\rho_{0p}} - \frac{\gamma+1}{\gamma}}{1 + \frac{2}{\gamma} - \frac{\rho_{sp}}{\rho_{00p}}}, \quad (5)$$

где A , n — эмпирические константы материала в уравнении Тэта [4], используемом для определения «холодной» составляющей давления $p_{sv} = A \left[(\rho_{sp}/\rho_{0p})^n - 1 \right]$; γ — коэффициент Грюнайзена.

Приведенная система соотношений (2)–(5) может быть сведена к единственному разрешающему уравнению относительно плотности материала пористого стержня ρ_{sp} на фронте присоединенной УВ. Для его получения необходимо заменить в соотношении (3) значение u_c согласно (4) разностью $v_0 - D_s$, а значения p_s и u_s — их выражениями

$$p_s = \rho_{00p} D_s^2 \left(1 - \frac{\rho_{00p}}{\rho_{sp}} \right); \quad u_s = D_s \left(1 - \frac{\rho_{00p}}{\rho_{sp}} \right), \quad (6)$$

полученными из (2). В результате соотношение (3) сводится к виду

$$\rho_{0b} (v_0 - D_s)^2 = \rho_{00p} D_s^2 \left(2 - \frac{\rho_{00p}}{\rho_{sp}} \right),$$

отсюда запишем выражение для скорости УВ в стержне

$$D_s = \frac{v_0}{1 + \sqrt{\frac{\rho_{00p}}{\rho_{0b}}} \sqrt{2 - \frac{\rho_{00p}}{\rho_{sp}}}}. \quad (7)$$

Заменяя в левой части зависимости (5) давление на фронте УВ в стержне p_s первым из соотношений (6) и дополнительно учитывая выражение (7), получаем уравнение

$$\frac{\rho_{00p} \left(1 - \frac{\rho_{00p}}{\rho_{sp}} \right) v_0^2}{\left(1 + \sqrt{\frac{\rho_{00p}}{\rho_{0b}}} \sqrt{2 - \frac{\rho_{00p}}{\rho_{sp}}} \right)^2} = 2A \frac{\frac{n-\gamma-1}{\gamma(n-1)} \left(\frac{\rho_{sp}}{\rho_{0p}}\right)^n + \frac{n}{n-1} \frac{\rho_{sp}}{\rho_{0p}} - \frac{\gamma+1}{\gamma}}{1 + \frac{2}{\gamma} - \frac{\rho_{sp}}{\rho_{00p}}}. \quad (8)$$

В уравнении (8) единственной неизвестной величиной остается плотность материала пористого стержня ρ_{sp} на фронте присоединенной УВ.

С использованием значения ρ_{sp} может быть рассчитана глубина проникания L пористого стержня длиной l_0 . Отношение L/l_0 равно отношению скоро-

сти проникания u_c к скорости «срабатывания» стержня (скорости уменьшения его длины) $v_0 - u_c$: $L/l_0 = u_c / (v_0 - u_c)$, согласно (4) $u_c = v_0 - D_s$, поэтому имеем $L/l_0 = v_0/D_s - 1$. Подстановка в это соотношение выражения (7) дает возможность представить отношение глубины проникания пористого стержня к его длине в виде следующей зависимости от значения ρ_{sp} :

$$\frac{L}{l_0} = \sqrt{2 - \frac{\rho_{00p}}{\rho_{sp}}} \sqrt{\frac{\rho_{00p}}{\rho_{0b}}} = \sqrt{2 - \frac{\alpha \rho_{0p}}{\rho_{sp}}} \sqrt{\frac{\alpha \rho_{0p}}{\rho_{0b}}}. \quad (9)$$

Для определения плотности ρ_{sp} необходимо численно решить алгебраическое уравнение (8). Однако при различных скоростях взаимодействия рассчитанная по (8) плотность материала пористого стержня ρ_{sp} на фронте УВ незначительно отличается от нормальной плотности монолита ρ_{0p} (это вполне естественно, так как после полной выборки пор сжимаемость материала резко уменьшается). При дополнительном предположении об уплотнении материала пористого стержня за фронтом УВ до нормальной плотности монолита (т. е. от плотности ρ_{00p} до плотности ρ_{0p}) [23, 24] сформулированная задача решается в аналитическом виде. В результате для глубины проникания пористого стержня с учетом (9) получаем следующее простое соотношение:

$$\frac{L}{l_0} = \sqrt{2 - \alpha} \sqrt{\frac{\alpha \rho_{0p}}{\rho_{0b}}}. \quad (10)$$

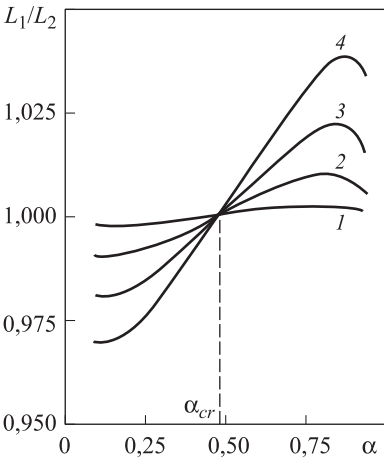


Рис. 4. Зависимость отношения L_1/L_2 от степени разуплотнения α при скоростях взаимодействия пористых медных стержней-ударников со стальной преградой $v_0 = 2$ (1), 4 (2), 6 (3) и 8 (4) км/с

Проанализируем погрешность определения глубины проникания пористого стержня с использованием допущения $\rho_{sp} = \rho_{0p}$. Зависимость отношения L_1/L_2 от степени разуплотнения α при различных скоростях взаимодействия v_0 пористых медных стержней-ударников со стальной преградой приведена на рис. 4. Глубина проникания L_1 рассчитана по (9) при точном определении из (8) плотности ρ_{sp} , глубина проникания L_2 — по (10) в предположении равенства плотностей $\rho_{sp} = \rho_{0p}$. Максимальное различие глубин проникания при точном и приближенном определении значения плотности ρ_{sp} не превышает 4 %. Все кривые L_1/L_2 для различных скоростей взаимодействия v_0 пересекаются в одной точке (см. рис. 4). В этой точке степень разуплотнения соответствует крити-

ческому значению $\alpha_{cr} = 2/(2+\gamma)$, при котором наблюдается переход от нормального к аномальному поведению ударной адиабаты Зельдовича — Забабахина (5) [18]. При $\alpha > \alpha_{cr}$ пористый материал уплотняется на фронте УВ до плотности ρ_{sp} , превышающей нормальную плотность монолита ρ_{0p} (нормальный ход ударной адиабаты). Поэтому согласно (9) и (10) значение L_1 несколько превышает значение L_2 . При $\alpha < \alpha_{cr}$ ударная адиабата ведет себя аномально (со снижением плотности пористого материала ρ_{sp} на фронте УВ относительно значения ρ_{0p}), вследствие чего значение L_1 несколько ниже значения L_2 . В точке пересечения кривых L_1/L_2 для различных скоростей взаимодействия v_0 (при $\alpha = \alpha_{cr}$) $L_1 = L_2$.

С учетом относительно небольшой погрешности определения глубины проникания, обусловленной допущением $\rho_{sp} = \rho_{0p}$, для оценки пробивного действия пористых стержней-ударников можно использовать соотношение (10), которое позволяет получить результат в конечном аналитическом виде [23]. Предсказываемая формулой (10) зависимость глубины проникания пористого стержня-ударника от степени его разуплотнения α хорошо согласуется с зависимостью, определенной с помощью численных расчетов (см. рис. 1). Отметим также, что в соответствии с (10) глубина проникания пористого стержня не зависит от его скорости (как и глубина проникания монолитного, рассчитанная по (1)). Это справедливо, как и для монолитного стержня, при достаточно высоких скоростях взаимодействия, позволяющих пренебречь прочностными свойствами материалов. При $\alpha = 1$ (монолитный стержень-ударник) зависимость (10) преобразуется в формулу Лаврентьева (1).

Как следует из сравнения соотношений (1) и (10), при одинаковых размерах и массе пористый стержень-ударник дает глубину проникания в $\sqrt{2-\alpha}$ раз большую, чем монолитный (сравниваемые ударники выполнены из различных материалов). В случае монолитного и пористого стержней равной массы и диаметра из одного и того же материала (см. работу [16]) приращение глубины проникания пористого стержня будет определяться не только изменением механизма его проникания, но и увеличением его длины. В результате глубина проникания пористого стержня превысит глубину проникания монолитного стержня согласно (10) в $\sqrt{(2-\alpha)/\alpha}$ раз (как уже отмечено выше, эти выводы справедливы, если можно пренебречь прочностью преграды).

Приближенно учесть прочностные свойства материала преграды при проникании пористого стержня, как и монолитного, можно на основе так называемой модифицированной гидродинамической теории [25]. Согласно этой теории, в уравнение Бернулли для преграды введем прочность H_b . В результате условие непрерывности давления на границе контакта (3), учитывающее формирование присоединенной УВ в пористом стержне-ударнике, преобразуется к виду $0,5\rho_{0b}u_c^2 + H_b = 0,5\rho_{sp}(v_0 - u_s - u_c)^2 + p_s$. С учетом этого для определения

глубины проникания пористого стержня в преграду с прочностью (в предположении, что пористый материал уплотняется на границе контакта до нормальной плотности монолита) получим соотношение

$$\frac{L}{l_0} = \frac{1 - \frac{\alpha(2-\alpha)\rho_{0p}}{\rho_{0b}}}{1 - \sqrt{\frac{\alpha(2-\alpha)\rho_{0p}}{\rho_{0b}} - \frac{2H_b}{\rho_{0b}v_0^2} \left[1 - \frac{\alpha(2-\alpha)\rho_{0p}}{\rho_{0b}} \right]}} - 1. \quad (11)$$

Из анализа зависимости (11) следует условие, при выполнении которого будет происходить проникание пористого стержня-ударника в преграду с прочностью

$$0,5\alpha\rho_{0p}v_0^2 > \frac{H_b}{2-\alpha}. \quad (12)$$

В соответствии с условием (12) степень разуплотнения пористого стержня (при фиксированной скорости v_0) должна быть не ниже $\alpha_{\min} = 1 - \sqrt{1 - 2H_b/(\rho_{0p}v_0^2)}$.

Если задана степень разуплотнения материала стержня α , то с использованием условия (12) минимальная скорость стержня $v_{0\min}$, которая необходима для проникания в прочную преграду, должна быть равна $v_{0\min} = \sqrt{2H_b/((2-\alpha)\alpha\rho_{0p})}$.

Пренебречь влиянием прочности преграды можно, если скорость стержня существенно превышает значение, рассчитываемое по приведенной зависимости. С увеличением пористости стержня предельная (уменьшением параметра α), значение $v_{0\min}$ возрастает. Так, при $H_b = 4$ ГПа (преграда из высокопрочной стали) для монолитного ($\alpha = 1$) медного стержня предельная скорость составляет $v_{0\min} = 950$ м/с, при пористости 50 % ($\alpha = 0,5$) — $v_{0\min} = 1\,100$ м/с, а при увеличении пористости стержня до 90 % ($\alpha = 0,1$) предельная скорость возрастает до 2 200 м/с. Следует отметить, что при равных плотностях пористого и монолитного стержней-ударников (из разных материалов) скорость $v_{0\min}$ пористого

стержня будет в $\sqrt{2-\alpha}$ раз ниже, чем монолитного.

Зависимости отношения L/l_0 , рассчитанные по (11), от степени разуплотнения α пористых медных стержней-ударников при проникании в стальную преграду с прочностью $H_b = 4$ ГПа приведены на рис. 5. Для сравнения на рис. 5 показаны подобные зависимости отношения L/l_0 для монолитных стержней той же плотности, что и пористые, предсказываемые модифицированной гидродинамической теорией. Преимущество в глубине проникания по-

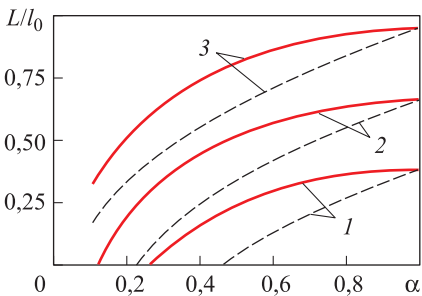
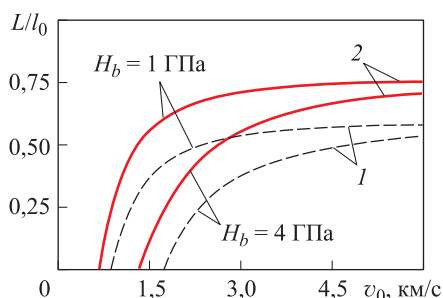


Рис. 5. Сравнительный анализ проникания пористых (сплошные линии) и монолитных (штриховые линии) стержней в прочную стальную преграду ($H_b = 4$ ГПа) при скорости взаимодействия $v_0 = 1,4$ (1), 2 (2) и 4 (3) км/с

ристых стержней над равными им по плотности монолитными увеличивается с возрастанием степени разуплотнения (уменьшением α), а при одном и том же значении α превышение глубины проникания пористого стержня значительно при более низких скоростях взаимодействия.

Зависимость глубины проникания в стальные преграды различной прочности от скорости монолитного алюминиевого и пористого медного стержней-ударников равной плотности приведена на рис. 6. Проникание пористого

Рис. 6. Зависимость глубины проникания в стальные преграды различной прочности от скорости монолитного алюминиевого (1) и пористого медного (2) стержней-ударников равной плотности



стержня начинает происходить при более низких скоростях. В области малых скоростей, примыкающей к порогу проникания монолитного стержня, относительное превышение глубины проникания пористого стержня максимально. С увеличением скорости взаимодействия влияние прочностного сопротивления преграды уменьшается и глубина проникания пористого медного стержня вне зависимости от значения H_b асимптотически стремится к значению, рассчитываемому по (10), а монолитного алюминиевого — к значению, определяемому по (1).

Закключение. Проведенный расчетно-теоретический анализ высокоскоростного проникания пористых стержней-ударников позволил выявить физические особенности, не проявляющиеся при проникании монолитных стержней. Эти особенности связаны с формированием в пористом стержне присоединенной УВ у границы контакта с преградой. Установленное различие пробивного действия монолитного и пористого стержней представляет интерес не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения. Полученные результаты определения глубины проникания пористых стержней могут быть использованы при прогнозировании эффективности пробивного действия кумулятивных зарядов с облицовками из порошкового материала, формирующими при взрывном обжатии кумулятивные струи, обладающие пористостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М.А. Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи математических наук. 1957. Т. 12. Вып. 4. С. 41–56.
2. Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т. 38. № 2. С. 3–9.

3. Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете // Прикладная механика и техническая физика. 1997. Т. 38. № 2. С. 10–18.
4. Физика взрыва / под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
5. Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Разработка материалов для беспестовых порошковых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1994. № 1. С. 25–31.
6. Войтенко Ю.И., Гошовский С.В., Драчук А.Г., Бугаец В.П. Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49. № 1. С. 125–133.
7. Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40. № 4. С. 25–35.
8. Тришин Ю.А., Кинеловский С.А. Влияние пористости на кумулятивное течение // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 2. С. 125–132.
9. Vouillard C., Roduner H.-P., Santschi W., Wister H. Performances and behavior of WCu-pseudoalloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve // Proc. of the 19-th Int. Symp. on Ballistics. Interlaken, Switzerland. 2001. P. 1479–1487.
10. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Об одном возможном способе повышения пробития кумулятивных зарядов // Известия РАН. 2004. № 3 (40). С. 27–32.
11. Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Влияние параметров порошков и порошковых облицовок на их рабочие характеристики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1994. № 3. С. 23–27.
12. Баскаков В.Д. Влияние технологических погрешностей кумулятивных зарядов на пробивную способность объемно разрушенных и кинематически согласованных струй // Оборонная техника. 2006. № 1–2. С. 86–89.
13. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Некоторые особенности формирования кумулятивных струй из порошковых материалов // Известия РАН. 2006. № 2 (47). С. 105–109.
14. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Особенности поведения в свободном полете кумулятивных струй из композитных порошковых облицовок // Оборонная техника. 2007. № 3–4. С. 38–53.
15. Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped-charge jet free flight behavior and its penetration capacity // Proc. of the 25-th Int. Symp. on Ballistics. Beijing, China. 2010. Vol. 2. P. 959–966.
16. Особенности высокоскоростного проникания сильнопористого ударника в мишень конечной толщины / С.А. Афанасьева, Н.Н. Белов, К.И. Козорезов, М.В. Хабибуллин, Н.Т. Югов // ДАН. 1997. Т. 355. № 2. С. 192–195.
17. Федоров С.В., Велданов В.А., Смирнов В.Е. Численный анализ влияния скорости и прочности удлиненных ударников из высокоплотного сплава на глубину их проникания в стальную преграду // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1. С. 65–83. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83

18. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
19. Федоров С.В., Баянова Я.М. Особенности гидродинамического режима проникания удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // Журнал технической физики. 2011. Т. 81. № 9. С. 45–51.
20. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
21. Симонов И.В. О сверхзвуковом соударении струй // ДАН. 2001. Т. 376. № 1. С. 48–52.
22. Осипенко К.Ю., Симонов И.В. О соударении струй: общая модель и редукция к уравнению состояния Ми — Грюнайзена // Известия РАН. Механика твердого тела. 2009. № 4. С. 172–182.
23. Федоров С.В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперскоростном взаимодействии // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 10. С. 131–134.
24. Veldanov V.A., Fedorov S.V., Dauriskikh A.Yu., Kozlov V.S. High-speed penetration of elongated porous projectiles // Proc. of the 26-th Int. Symp. on Ballistics. Miami, Florida, USA. 2011. Vol. 2. P. 1420–1428.
25. Алексеевский В.П. К вопросу о проникании стержня в преграду с большой скоростью // Физика горения и взрыва. 1966. Т. 2. № 2. С. 99–106.

Федоров Сергей Владимирович — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Бабкин Александр Викторович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Велданов Владислав Антонович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Гладков Николай Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Федоров С.В., Бабкин А.В., Велданов В.А., Гладков Н.А., Ладов С.В. О высокоскоростном проникании стержней из пористого материала // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 5. С. 18–32. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-18-32

HIGH-VELOCITY PENETRATION OF POROUS MATERIAL RODS

S.V. Fedorov

A.V. Babkin

V.A. Veldanov

N.A. Gladkov

S.V. Ladov

sergfed-64@mail.ru

shef-pk@ya.ru

vevladi@mail.ru

n.a.gladkov@yandex.ru

ladov-sv@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this article we study the influence of material porosity on penetrative action of the powder shaped-charge jets formed during the explosive collapse of the liners pressed from metal powder. We employed numerical modeling within a two-dimensional axisymmetric problem of continuum mechanics. It allowed us to research the features of elongated porous projectiles penetration into a steel target in the hydrodynamic mode (interaction velocity is several kilometers per second). We considered the compressible elastic-plastic matter with the Tait's barotropic equation of state as a target material. The model for the behavior of porous projectile material was based on the assumption that closing of micropores in the porous matter happens at a zero pressure, so it behaves as monolithic. We compared the numerical modeling results with the prediction given by the hydrodynamic theory with the incompressible liquid assumption. We established that penetration depth of porous rods exceeds the value calculated on Lavrentiev's formula. The analysis of interaction in numerical calculations allows to assume that this deviation is connected with formation of the attached shock wave near a surface of contact with a target in the course of penetration (penetration process for the porous projectile has supersonic character due to essential reduction of sound speed in porous materials). Based on this assumption and considering penetration process, Lavrentiev's liquid jets collision in this article we offer a simple model of elongated porous projectile penetration. Its mathematical description includes system of equations for the attached shock wave front in the projectile, continuity conditions on the surface of projectile and target contact and Bernoulli's equation which connects state parameters on a contact surface with the shock wave parameters and with parameters of the target. This model for porous projectile penetration depth allowed us to define the ratio containing the additional multiplier to the original Lavrentiev's formula. The multiplier depends on material porosity. The output of calculations with this ratio is in compliance with the result of numerical modeling

Keywords

High-velocity penetration, powder shaped-charge jet, hydrodynamic mode, elongated projectile, porous material, penetrative action, steel target, attached shock wave

REFERENCES

- [1] Lavrent'ev M.A. Cumulative charge and principles of its operation. *Uspekhi Mat. Nauk* [Russian Mathematical Surveys], 1957, vol. 12, no. 4, pp. 41–56 (in Russ.).

- [2] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Characteristics of inertially stretching shaped-charge jets in free flight. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 171–176.
- [3] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Effect of shaped-charge jet compressibility and strength on the characteristics of their inertial stretching in free flight. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2, pp. 177–184.
- [4] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva. V 2 t. T. 2* [Physics of explosion. In 2 vol. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 656 p.
- [5] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. Development of materials for the coreless powder liners of shaped charge perforators. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 1994, no. 1, pp. 25–31 (in Russ.).
- [6] Voitenko Yu.I., Goshovskii S.V., Drachuk A.G., Bugaets V.P. Mechanical effect of shaped charges with porous liners. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 109–116.
- [7] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. Regularities of the stretching and plastic failure of metal shaped-charge jets. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 4, pp. 571–580.
- [8] Trishin Yu.A., Kinelovskii S.A. Effect of porosity on shaped-charge flow. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 272–281.
- [9] Voumard C., Roduner H.-P., Santschi W., Wister H. Performances and behavior of WCu-pseudoalloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve. *Proc. of the 19-th Int. Symp. on Ballistics*. Interlaken, Switzerland. 2001, pp. 1479–1487.
- [10] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. On one possible way of shaped-charges penetrability increase. *Izv. Ross. Akad. raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2004, no. 3 (40), pp. 27–32 (in Russ.).
- [11] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. Influence of powders and powder liners parameters on their performance characteristics. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 1994, no. 3, pp. 23–27 (in Russ.).
- [12] Baskakov V.D. Influence of shaped-charges technological imperfection on penetrability of volume destroyed and kinematic coordinated jets. *Oboronnaya tekhnika* [Defence Technology], 2006, no. 1–2, pp. 86–89 (in Russ.).
- [13] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Some features of powder material shaped-charge jets formation. *Izv. Ross. Akad. raketnykh i artilleriyskikh nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences], 2006, no. 2 (47), pp. 105–109 (in Russ.).
- [14] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Features of behavior in free flight of shaped-charge jets from composite powder liners. *Oboronnaya tekhnika* [Defence Technology], 2007, no. 3–4, pp. 38–53 (in Russ.).
- [15] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped-charge jet free flight behavior and its penetration capacity. *Proc. of the 25-th Int. Symp. on Ballistics*. Beijing, China. 2010, vol. 2, pp. 959–966.
- [16] Afanas'eva S.A., Belov N.N., Kozorezov K.I., Khabibullin M.V., Yugov N.T. The features of high-velocity penetration of a highly porous impactor into a target of finite thickness. *Doklady Physics*, 1997, vol. 42, no. 7, pp. 381–384.

- [17] Fedorov S.V., Veldanov V.A., Smirnov V.E. Influence numerical analysis of velocity and strength of high density alloy elongated projectiles on their penetration depth into steel target. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 1, pp. 65–83 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-65-83
- [18] Zel'dovich Ya.B., Rayzer Yu.P. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy [Physics of shock waves and high temperature hydrodynamical phenomena]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 688 p.
- [19] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M. Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 56, no. 9, pp. 1266–1271.
- [20] Nigmatulin R.I. Osnovy mekhaniki geterogennykh sred [Fundamentals of heterogeneous matters mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 336 p.
- [21] Simonov I.V. On supersonic jet collision. *Doklady Physics*, 2001, vol. 46, no. 1, pp. 45–49.
- [22] Osipenko K.Yu., Simonov I.V. On the jet collision: general model and reduction to the Mie — Gruneisen state equation. *Mechanics of Solids*, 2009, vol. 44, no. 4, pp. 639–648.
- [23] Fedorov S.V. On the penetration depth of a porous striker moving with a hypersonic velocity. *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 52, no. 10, pp. 1379–1382.
- [24] Veldanov V.A., Fedorov S.V., Dauriskikh A.Yu., Kozlov V.S. High-speed penetration of elongated porous projectiles. *Proc. of the 26-th Int. Symp. on Ballistics*. Miami, Florida, USA. 2011, vol. 2, pp. 1420–1428.
- [25] Alekseevskiy V.P. Penetration of a rod into a target at high velocity. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1966, vol. 2, no. 2, pp. 63–66.

Fedorov S.V. — senior teacher of High-Precision Flying Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Babkin A.V. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of High-Precision Flying Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Veldanov V.A. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of High-Precision Flying Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Gladkov N.A. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ladov S.V. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of High-Precision Flying Vehicles Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fedorov S.V., Babkin A.V., Veldanov V.A., Gladkov N.A., Ladov S.V. High-Velocity Penetration of Porous Material Rods. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 5, pp. 18–32. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-18-32