

УДК 622.235.5:622.26

## МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ С ПОРИСТЫМИ ОБЛИЦОВКАМИ

Ю. И. Войтенко<sup>1</sup>, С. В. Гошовский<sup>1</sup>, А. Г. Драчук<sup>1</sup>, В. П. Бугаец<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Украинский государственный геологоразведочный институт, 04114 Киев, Украина  
voytenko@ukrdgri.gov.ua

<sup>2</sup>Научно-инженерный центр «Материалобработка взрывом» Института электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 08631 Глеваха, Украина

Представлены экспериментальные данные о пробитии кумулятивными зарядами с пористыми облицовками металлических мишеней, расположенных на расстояниях, меньших или соизмеримых с калибром заряда, а также некоторые экспериментальные данные о скорости кумулятивных струй исследованных зарядов с облицовками из металлических порошков.

Ключевые слова: детонация, кумулятивный заряд, облицовка, кумулятивная струя, порошковый материал, пористость материала.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследованию кумулятивного, газо- и гидродинамического, осколочного и ударно-волнового действия кумулятивного заряда в конденсированных средах посвящен ряд работ [1–3], в том числе монография [4].

В настоящей работе внимание сосредоточено на кумулятивном действии заряда с кумулятивной выемкой, покрытой пористым металлом, спрессованным из порошкового материала. Результаты получены при разработке зарядов кумулятивных перфораторов, предназначенных для геологоразведочных работ, где требуется пробить глубокие отверстия небольшого диаметра или большого диаметра, но малой глубины.

Увеличение диаметра отверстия в мишени с одновременным уменьшением глубины можно получить, увеличивая угол в вершине кумулятивной облицовки традиционной конической формы либо используя облицовки нетрадиционных форм: сферической, цилиндрической, цилиндроконической или в виде сферического сегмента [4–6].

Ниже показано, что, применяя пористые облицовки из порошковых материалов, можно получать отверстия разных диаметров, пробитые на разную глубину, и при этом не менять традиционную коническую форму облицовки.

В основу кумулятивного заряда с пористой облицовкой положена идея работы [7], состоя-

щая в том, что материал пористой облицовки нагревается сильнее, чем материал монолитной облицовки. Это приводит к уменьшению вязкости материала облицовки при разгоне ее зарядом взрывчатого вещества (ВВ).

Процесс формирования кумулятивной струи (КС) и ее кинематические параметры определяются интенсивностью ударной волны и волны разрежения в материале облицовки, а также количеством тепла, выделяемого при сжатии материала. Роль последнего фактора возрастает при увеличении пористости и, соответственно, сжатии материала облицовки. Поэтому с ростом пористости облицовок повышается пробивная способность заряда, при этом существует оптимальная пористость облицовок, при которой пробивная способность заряда максимальна при неизменной конфигурации его конструктивных элементов [7]. При увеличении пористости выше оптимальной глубина пробития мишени снижается.

Другая идея, касающаяся механизма проникания струй в виде потока диспергированных частиц, сформулирована в работе [8]: наличие в пористых ударниках присоединенной ударной волны, в которой материал ударника, в частности КС, уплотняется практически до плотности монолита, поскольку для материала КС реализуется режим сверхзвукового проникания даже при небольших скоростях движения КС.

В работе [9] предложено несколько физических механизмов, определяющих поведение в свободном полете и пробивную способность

КС, образующейся из гомогенной и композитной пористых облицовок. Например, изложена гипотеза о саморазрушении композитной КС при ее растяжении в свободном полете после уплотнения материала на начальной стадии формирования КС, по свойствам близкой к монолитной. Для обеспечения этого эффекта и получения объемно-разрушенной, кинематически согласованной, с неограниченным удлинением КС необходимо, чтобы материал матрицы и материал добавок в композите резко отличались по свойствам, в частности по сжимаемости [9].

В работе [9] отмечены также эффекты противоположной направленности, которые могут приводить к радиальному рассеиванию материала струи и снижению ее проникающей способности, а именно:

- расширение содержащегося в порошковой струе внутрипорового воздуха после его ударно-волнового нагружения в составе схлопывающейся облицовки;

- образование дополнительной нагретой газовой фазы из-за экзотермической реакции окисления некоторых легирующих добавок в ходе схлопывания облицовки;

- высвобождение по ходу растяжения порошковой струи потенциальной энергии объемного деформирования сильносжимаемыми легирующими добавками.

Получены количественные оценки этих эффектов для чистой меди и некоторых композитов в диапазоне пористости  $0.02 \div 0.2$ . В частности, показано, что на начальной стадии растяжения порошковой кумулятивной струи из перечисленных факторов наиболее существенным является потенциальная энергия объемного деформирования материала струи. По мере удлинения КС значение этого фактора быстро уменьшается, а на первый план выходят энергетические возможности внутрипорового воздуха. При пористости 0.20 и более работоспособности внутрипорового газа достаточно не только для торможения и остановки радиально сходящегося к оси симметрии массопотока, но и для инициирования радиального дивергентного движения.

В работе [10] структура, динамика и фрагментация струи из псевдосплава W—Cu были изучены с помощью рентгеноимпульсной съемки. Получены следующие основные результаты:

- КС из псевдосплава W—Cu (75/25 % по мас-

- се) представляет собой поток частиц (не более  $5 \div 6$  в сечении КС) или их конгломератов в хвостовой части (не более  $1 \div 3$  в сечении КС);
- разрушение струи из псевдосплава W—Cu происходит гораздо раньше, чем медной струи;
- наилучшее проникание КС из кумулятивной облицовки толщиной 1.5 мм заряда диаметром 100 мм наблюдается при расстоянии от заряда до мишени, равном  $7.5 \div 10$  калибров;
- скорость элементов струи изменяется линейно вдоль струи.

Большинство фрагментов не являются стабильными, и после дальнейших делений КС представляет собой поток мелких частиц, в отличие от медной КС, где сохраняются массивные фрагменты.

В работе [11] исследовалось влияние различных добавок к исходному порошковому материалу (Cu) на процесс пестообразования при взрыве заряда с конической облицовкой и углом раствора конуса  $60^\circ$ . Пористость материала облицовки не превышала 12.8 %. Установлено, что оптимальными добавками, увеличивающими глубину пробития, являются свинец (10 %) и графит (0.5 %). Добавка Pb (10 %) использовалась в некоторых описанных ниже экспериментах. Картина разрушения КС из сплошного и пористого материалов аналогична полученной в работе [10].

Особенности конструкций кумулятивного заряда для перфорационных работ в нефтяных и газовых скважинах определяются ограниченным диаметром скважины и характеризуются длиной пашки ВВ, соизмеримой с ее диаметром, при этом вершина облицовки находится практически возле основы пашки, чтобы получить довольно длинную высокоскоростную КС и большую глубину пробития мишени.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились с использованием следующих методик:

- исследование исходных порошков для кумулятивной облицовки методами оптической, электронной микроскопии и микрозондового анализа;

- определение пористости облицовки методом гидростатического взвешивания;

- измерение скорости головной части КС с использованием электроконтактных датчиков;

- измерение параметров пробития мишени (глубины и диаметра образованного канала).

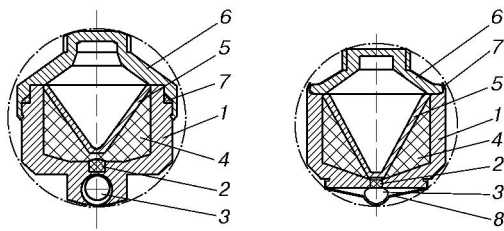


Рис. 1. Схемы кумулятивных зарядов ЗГ2-42 (а) и ЗКМ-38 (б):

1 — корпус, 2 — высокочувствительное ВВ, 3 — детонирующий шнур, 4 — шашка ВВ, 5 — кумулятивная облицовка, 6 — крышка, 7 — кольцо уплотнительное, 8 — крепление

В качестве материала для пористой облицовки (рис. 1) были использованы порошки меди, вольфрама, свинца, олова и алюминия, а также их смеси (W—Cu—Pb, W—Cu—Sn, Cu—Al, W—Pb, W—Al).

Для получения облицовок разной пористости заготовки прессовали на гидравлическом прессе с разными давлениями.

Заряды в разных сериях экспериментов устанавливались на разных расстояниях от мишени.

Основные типы мишеней:

- а) набор пластин из стали Ст. 3 толщиной 10 мм;
- б) набор пластин из алюминиевого сплава АМЦ-Н (твёрдость по Виккерсу  $H_V = 55.0$  МПа) с верхней пластиной из Ст. 3 толщиной 10 мм.

Методика проведения экспериментов на мишенях, в частности, с измерением скорости головной части КС показана на рис. 2. Расстояние до ближайшего датчика 10 составляло 35 мм, расстояние между датчиками — 50 мм. В опытах по измерению скорости КС в центре крышки зарядов (см. рис. 1) предварительно просверливалось отверстие диаметром  $6 \div 7$  мм.

Для определения глубины пробития мишени Ст. 3 — АМЦ-Н использовалось 12 зарядов соответствующего калибра. Промышленные эксперименты на стальных мишенях проводятся серией из 20 опытов не реже одного раза в месяц. Статистический разброс глубин пробития мишени зарядами с углом раствора конуса в вершине кумулятивной облицовки  $70^\circ$  и  $55^\circ/60^\circ$  не превышал  $6 \div 7 \%$ , а с углом раствора конуса  $43^\circ/45^\circ, 44^\circ/48^\circ$  —  $12 \div 13 \%$ .

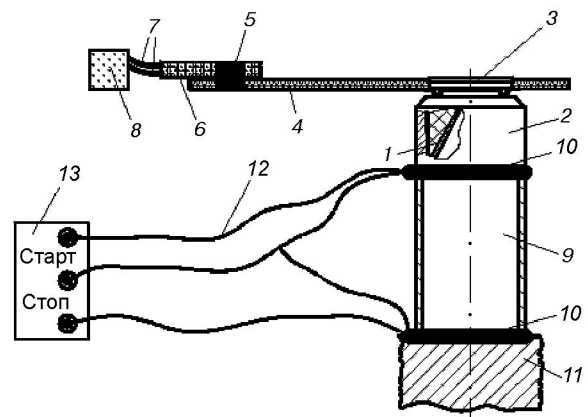


Рис. 2. Схема измерения скорости головной части КС:

1 — кумулятивная облицовка, 2 — кумулятивный заряд, 3 — крепление детонирующего шнура, 4 — лента полиэтиленовая с липким пластырем, 5 — электродетонатор, 6 — взрывная магистраль, 7 — конденсаторная взрывная машинка, 8 — подставка, 9 — электроконтактные датчики, 10 — мишень, 11 — электропровод, 12 — электронный частотомер

Относительная погрешность определения скорости головной части КС составляла  $5 \div 6 \%$ , пористости материала облицовки —  $3 \div 5 \%$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 3 показаны зависимости глубины

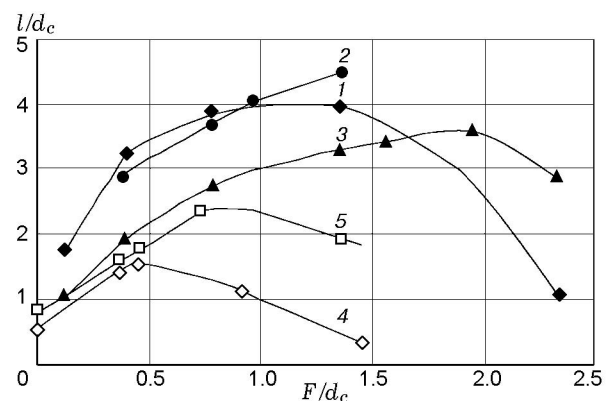


Рис. 3. Зависимость глубины пробития стальной преграды от фокусного расстояния для кумулятивного заряда ЗКМ-38 с облицовкой из пористого композита W—Cu—Sn ( $\rho_{00} = 10.16$  г/см<sup>3</sup>, кривая 1), композита W—Pb ( $\rho_{00} = 12.24$  г/см<sup>3</sup>, кривая 2), меди ( $\rho_{00} = 6.60$  г/см<sup>3</sup> — кривая 3,  $\rho_{00} = 3.76$  г/см<sup>3</sup> [7] — кривая 4), никеля ( $\rho_{00} = 4.57$  г/см<sup>3</sup> [7], кривая 5).

Таблица 1

Параметры пробития мишеней различными зарядами кумулятивных перфораторов

№ п/п	Название заряда	Материал облицовки	$d_c$ , мм	$M$ , г	$2\alpha$ , град ( $2\alpha_1/2\alpha_2$ )	Материал корпуса	$l$ , мм/ $d_1$ , мм	Материал мишени	Расстояние до первой преграды, мм
1	ЗГ2-42	Cu	25.7	11.2	70	Ст.45	55.3/8.8	Сталь	10.5
2	ЗГ2-42*	W—Cu—Pb	25.7	11.2	70	—//—	63.5/9.0	—//—	10.5
3	ЗКМ-38К	W—Cu—Pb	25.7	10.0	55 (60)	—//—	72.5/8.1	—//—	9.0
4	ЗКМ-38Д	W—Cu—Pb	25.7	10.0	—	—//—	90.7/8.0	—//—	13.1
5	ЗКМ-38Б	Al	25.7	10.0	70	—//—	19.4/18.6	—//—	9.0
6	ЗКМ-38-ВБ	Cu	25.7	10.0	55 (60)	—//—	53.5/9.0	—//—	9.0
7	ЗКМ-У-54Б	Al	30.5	18.0	44 (48)	—	33.8/19.8	—	13.0
8	ЗКМ-У-54К <sub>2</sub>	W—Cu—Pb	30.5	18.0	44 (48)	Ст. 45	134.5/11.6	Сталь	13.0
9	ЗКМ-У-54ВБ	Cu	30.5	18.0	44 (48)	—//—	85/16	—//—	13.0
10	ЗКМ-У-54К <sub>1</sub>	W—Cu—Pb	30.5	18.0	44 (48)	—//—	127/11.5	—//—	13.0
11	ЗП1-67	Cu	33.0	22.0	60	—//—	110/21	—//—	35.0
12	ЗП2-67	Cu	37.0	23.0	43 (45)	Порошок железа с пластификатором	152/15	—//—	35.0
13	ЗК1-80С	W—Cu—Pb	30.5	16.0	44 (48)	Стекло — свинец	99/10	—//—	21.0
14	ЗК1-80С*	W—Cu—Pb	30.5	16.0	44 (48)	—//—	127/9	—//—	21.0
15	ЗК2-80С	W—Cu—Pb	30.5	16.0	44 (48)	—	115.9/10.2	—//—	29.0
16	ЗП1-52У**	Cu	30.0	16.0	60	Ст. 45	98.6/14	—//—	35.0
17	ЗГ2-100-150/50	Cu	35.6	48±2	60	Стекло	115.3/13	—//—	31.5
18	ЗКМ-38Д	W—Cu—Pb	25.7	10.0	55 (60)	—	170.8/6.9	Ст. 3-АМЦ-Н	13.1
19	ЗКМ-У-54К	W—Cu—Pb	30.5	18.0	44 (48)	—	292.9/9.0	Ст. 3-АМЦ-Н	13.0

\* Облицовка на основе порошка W сферической и сфероидной формы; \*\* коническая облицовка со сферической вершиной.

ны пробития стальной мишени от относительного расстояния до первой пластины кумулятивного заряда ЗКМ-38 с медной облицовкой (кривая 3), с композитной облицовкой W—Pb (50/50 % по массе) (кривая 2) и с композитной облицовкой W—Cu—Sn (70/20/10 % по массе) (кривая 1). Зависимости 1–3 качественно соответствуют полученным в работе [7] для облицовок из меди и никеля. Если сравнить вид и положение зависимостей 1–3, дополнить их кривыми для пористой меди плотностью  $\rho_{00} = 2.78 \text{ г/см}^3$  [7] (на рис. 3 не приведена),  $\rho_{00} = 3.76 \text{ г/см}^3$  (кривая 5) и для никеля плотно-

стью  $\rho_{00} = 4.17 \text{ г/см}^3$  [7] (кривая 4), можно утверждать, что для малоплотных высокопористых облицовок пористостью  $m = 2.1 \div 3.2$  (кривые 4, 5) фокусное расстояние для стальной мишени находится в диапазоне расстояний  $\approx (0.4 \div 1)d_c$ , для более плотных облицовок с  $m = 1.35 \div 1.46$  (кривые 1, 3) оно смещается вправо и составляет  $(1 \div 2)d_c$ . На фокусном расстоянии фактически вся КС или большая ее часть участвуют в процессе проникания. На малых расстояниях, меньших фокусного (левая восходящая ветвь кривых), КС не успевает реализовать потенциальные возмож-

ности головных и средних частей. На больших расстояниях (правая нисходящая часть кривых) эффективность пробития уменьшается вследствие радиального рассеяния и уплотнения струи. Причины радиального рассеяния струй из высокопористых порошковых материалов определены в [9].

Замена части свинцового порошка (кривая 2) на медь и олово (кривая 1) в композитном материале облицовки незначительно (в пределах погрешности эксперимента) увеличивает глубину пробития. Замена в композите W—Cu—Sn олова на свинец не дает ощутимого изменения результатов. С учетом того, что температура вдоль КС превышает температуру плавления свинца [4, 7], струя представляет собой поток жидкого свинца, несущего частички вольфрама (кривая 2), а в случае зависимости 1 она представляет собой поток частиц вольфрама и меди в кристаллической фазе, т. е. поток вещества с некоторой пористостью со всеми перечисленными выше эффектами, сопровождающими образование, растяжение и проникание КС в преграду [9, 10].

Необходимо отметить различие в агрегатном состоянии алюминиевой струи, взаимодействующей с преградой, и струй из смесей W—Cu—Pb и W—Cu—Sn (соотношение компонентов по массе  $70/(20 \div 25)/(10 \div 5)$  %). Наличие расплавленного металла на крышке заряда и на пластинах мишени из АМЦ-Н при использовании первой смеси и полное его отсутствие во втором случае позволяют предположить, что в первом случае материал струи расплавился и расплавил материал мишени (АМЦ-Н), а во втором только легкоплавкие компоненты смеси (Sn и Pb) перешли в жидкое состояние.

В табл. 1 приведены данные о пробитии стальных и алюминиевых мишеней зарядами разных конфигураций. Здесь  $d_c$  — диаметр кумулятивной воронки у основания,  $M$  — масса ВВ,  $2\alpha$  — угол в вершине облицовки,  $l$  — глубина пробития,  $d_1$  — диаметр входного отверстия.

Практически все результаты соответствуют современным представлениям о влиянии основных технологических факторов на пробитие мишени, кроме результатов № 14 и 15. В этих экспериментах использовались одинаковые кумулятивные заряды, отличающиеся только расстоянием до первой преграды (стеклянной крышки). Причем в заряде ЗК2-80С оно на 8 мм больше, чем в заряде ЗК1-80С. Поэто-

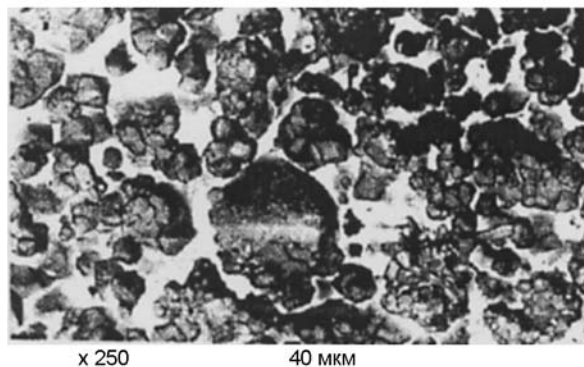


Рис. 4. Микрофотографии зерен порошка вольфрама сфероидной формы

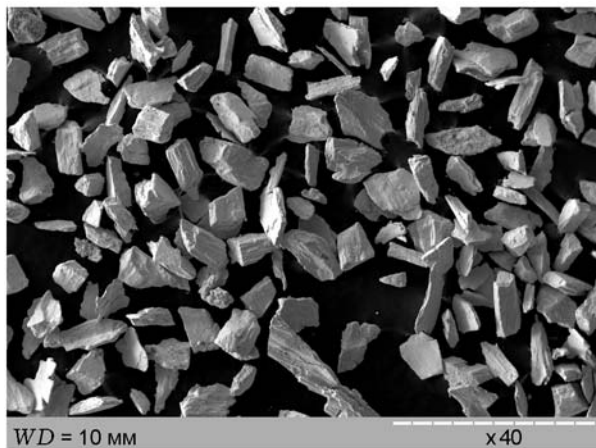


Рис. 5. Микрофотографии зерен порошка вольфрама пластинчатой формы

му при одинаковых материалах облицовки заряд ЗК2-80С пробивал отверстие на  $15 \div 23$  % глубже, чем ЗК1-80С (№ 13). В табл. 1 приведены результаты для разных исходных порошков вольфрама. В заряде ЗК1-80С (№ 14) использован материал с частицами сферической и сфероидной форм, полученными методом порошковой металлургии (рис. 4). Для заряда ЗК2-80С (№ 15) и остальных зарядов, кроме № 2, вольфрам получен путем размалывания исходного вольфрамового вторичного сырья в условиях криогенного воздействия с отсеиванием частиц вытянутой или пластинчатой формы (рис. 5). Массовый состав композитной смеси W—Cu—Pb во всех зарядах — 70/20/10 %. Медь, полученная электрохимическим способом, была в зарядах одинаковой. Это свидетельствует о влиянии фрактальных свойств материала облицовки на результат пробития мишени.

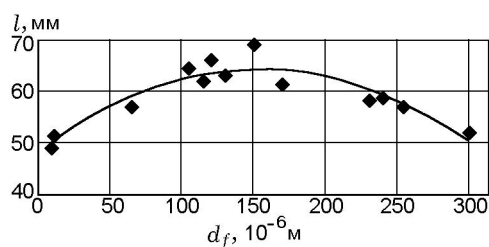


Рис. 6. Зависимость глубины пробития кумулятивным зарядом ЗГ2-42 от размера зерен порошкового материала облицовки

Заряды ЗКМ-У-54К № 8 и 10 (см. табл. 1) отличаются способом изготовления:

— двойное прессование заряда: отдельно изготавливались облицовка и пашка ВВ в корпусе, затем облицовка запрессовывалась в ВВ (образец № 8);

— одинарное прессование заряда: отдельно изготавливалась облицовка, затем запрессовывалась в ВВ насыпной плотности (образец № 10).

В экспериментах обнаружена незначительная зависимость глубины пробития мишени от размеров фракций исходного порошкового материала, представляющего собой зерна сфероидной формы (рис. 6). Для зерен пластинчатой формы такая зависимость должна находиться ниже кривой, приведенной на рис. 6, и должна иметь восходящую и нисходящую ветви по причинам, которые изложены ниже. На основании этой зависимости были выбраны оптимальные диапазоны размеров фракций, в том числе из вольфрама пластинчатой формы.

## АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние размеров фракций исходного материала облицовки на глубину пробития мишени отмечалось и другими авторами [11]. Объяснить такое влияние при существующей технологии изготовления кумулятивного заряда и облицовки можно, очевидно, с позиции формирования материала с оптимальной пористостью [9]. Влияние формы примерно одинаковых по размерам частиц порошка вольфрама, обнаруженное в экспериментах с разными зарядами, можно объяснить разными фрактальными характеристиками этих материалов, а также если рассматривать материал КС как поток высокоскоростных частиц, — эффектами на уровне действия отдельных частиц или их конгломератов. В монографии [4] приведены данные о глубине проникания симметричных

ударников в мишень в зависимости от их формы: ударники округлой формы и близкие к ним уступают удлинённым ударникам, движущимся в направлении, совпадающем с более длинной осью, однако превосходят их при соударении последних с мишенью боковой поверхностью. Кроме того, в [4] не рассмотрены промежуточные случаи — взаимодействие ударника с мишенью, когда направление его движения не совпадает с длинной осью. Возможно, эти особенности взаимодействия частиц неправильной формы с преградой приводят к уменьшению интегральной глубины пробития. Не исключено, что пористости облицовок из порошка вольфрама с частицами пластинчатой и сфероидной форм отличаются. Однако в данной работе это не исследовалось.

Влияние фракционности порошкового материала облицовки при выполнении условий контрастности свойств и химической инертности компонентов [9] проявляется в формировании кумулятивного течения как потока частиц, сохраняющего преимущества пористых ударников [8]. Это реализуется в определенном диапазоне фракций. С увеличением размеров идеализированных фракций сфероидной формы пористость (объем пустот) не меняется, однако увеличивается размер пор и уменьшается их количество. В случае очень крупных фракций, соизмеримых с толщиной облицовки, пористость представляет собой совокупность редких пустот. При этом теряются преимущества пористых материалов и снижается глубина пробития (см. рис. 6). Поскольку разрушение материала облицовки при схлопывании и кумулятивной струи при растяжении происходит преимущественно по границам фаз (W, Cu, Al), желательно, чтобы размеры фракций разных материалов были примерно одинаковыми. Для частиц близких размеров (W, Cu или Al) при схлопывании облицовки в кумулятивном течении наблюдается картина, описанная в [10]: относительно равномерное движение частиц в КС. В случае, когда частицы W много меньше частиц Cu, в кумулятивном потоке движутся преимущественно конгломераты частиц W—Cu либо мелкие частицы W и конгломераты частиц W—Cu. То есть размеры фракций исходного материала для облицовки влияют на структуру течения в КС и через нее на глубину пробития. В настоящих экспериментах использование мелких частиц W ( $\approx 1 \div 4$  мкм) уменьшало глубину пробития

Таблица 2  
Результаты определения пористости  
медной кумулятивной облицовки

Тип кумулятивного заряда	$\rho_{00},$ г/см <sup>3</sup>	Средняя пористость облицовки*	
		$m = \frac{\rho_0}{\rho_{00}}$	$\Pi = (1 - \rho_{00}/\rho_0) \times 100 \%$
ЗКМ-38	6.55	1.36	26
	7.96**	1.12	11
	6.46***	1.38	28
ЗГ2-42	7.02	1.27	22
ЗКМ-У-54	6.14	1.45	31
ЗП2-67	6.49	1.37	27

\* $\rho_0$  — плотность сплошного материала облицовки,  $\rho_{00}$  — плотность пористого материала облицовки; \*\*часть облицовки с конической вершиной высотой  $h = 4 \div 6$  мм; \*\*\*фрагменты облицовки с конической основой высотой  $h = 10 \div 14$  мм.

стальной мишени в  $1.5 \div 1.3$  раза. Из физических соображений размеры исходных фракций порошка, если за единицу взять толщину облицовки, должны быть не более  $1/5 \div 1/8$ . В описанных экспериментах эта величина не превышала  $0.1 \div 0.125$ .

В табл. 2 приведены результаты определения пористости медных облицовок, изготовленных способом одностороннего холодного прессования различных зарядов. Как показывает анализ полученных результатов, пористость материала конической вершины такой облицовки высотой около  $(0.2 \div 0.3)h$  меньше интегральной (средней) пористости остальной части в  $2.3 \div 2.4$  раза. Из табл. 2 следует, что интегральная пористость облицовки в исследованных зарядах колеблется от 22 до 31 %. Снижение давления прессования облицовки в 2.71 раза, по сравнению с максимальным (табл. 3) приводит к повышению относительной пористости на  $14 \div 16$  %.

Дополнительно была проведена серия экспериментов по изучению зависимости скорости головной части КС от давления прессования облицовки  $p_{pr}$ . Как видно из табл. 3, пористость слабо влияет на скорость головной части КС (в табл. 3 приведены средние значения скорости по результатам трех-четырёх измерений), что обусловлено повышенной плотностью и меньшей пористостью материала в вершине облицовки по сравнению с ее общей по-

Таблица 3  
Результаты измерения скорости  
головной части кумулятивной струи  
заряда ЗКМ-38 при различных давлениях  
прессования облицовки W—Cu—Pb

$p_{pr},$ МПа	$m$	$v_j,$ км/с
430	1.47	7.14
490	1.45	6.99
550	1.42	6.91
765	1.36	6.69
1165	1.27	6.59

ристостью. Особенности одностороннего прессования и деформирования материала, а также форма облицовки в вершине приводят к образованию здесь зоны повышенной плотности (см. табл. 2). Пористость в этой части облицовки примерно в  $2.5 \div 3$  раза меньше общей пористости и мало зависит от давления прессования в этом диапазоне давлений [12].

Анализ геометрических параметров перфорационных отверстий (см. табл. 1) показывает, что использование порошковых облицовок в кумулятивных зарядах позволяет получить, сравнительно со сплошными облицовками, качественно другие результаты кумулятивного пробития мишени.

Так, в стальной мишени можно получить перфорационное отверстие размеров  $d_1 = 12$  мм,  $l = 60$  мм в случае конической монолитной медной облицовки и  $d_1 = 10$  мм,  $l = 16$  мм в случае конической монолитной алюминиевой облицовки [4]. При использовании же порошковых алюминиевых облицовок, при прочих равных условиях, наблюдается увеличение диаметра входного отверстия (см. табл. 1).

Для уточнения этого эффекта были проведены исследования кумулятивного пробития алюминиевой мишени зарядом, облицовка которого была изготовлена из алюминия с зернами сфероидной формы размером  $\approx 5 \div 50$  мкм и меди с зернами дендритной формы размером  $\approx 100 \div 160$  мкм при прочих равных условиях. Облицовки прессовались из порошка алюминия, меди и их смесей с разным содержанием компонентов. Исследовались заряды с коническими облицовками трех геометрических конфигураций:  $2\alpha = 44^\circ/48^\circ$ ,  $2\alpha = 55^\circ/60^\circ$ ,  $2\alpha = 70^\circ$ , располагавшиеся на разных расстояниях от мишени.

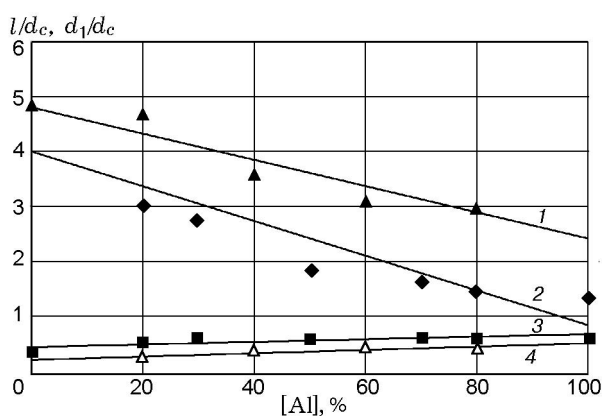


Рис. 7. Зависимости размеров отверстия от содержания алюминия в порошковом материале облицовки:

относительной глубины пробития: 1 — W—Al, 2 — Cu—Al; относительного диаметра входного отверстия в стальной пластине: 3 — Cu—Al, 4 — W—Al; 2, 3 — расстояние до мишени 50 мм, 1, 4 — 37 мм; расстояние до первой преграды — 9 мм

Зависимости относительной глубины пробития и относительного диаметра входного отверстия в стальной пластине от массового содержания алюминия в материале пористой облицовки приведены на рис. 7. Видно, что параметры пробития мишени изменяются в первом приближении по линейным законам.

Использовался вольфрам пластинчатой формы со средним размером фракций  $100 \div 200$  мкм. Исследования медных облицовок методами оптической и электронной микроскопии показали, что размеры пор в них изменяются в диапазоне  $5 \div 50$  мкм, т. е. в случае композитной оболочки из порошка Cu—Al часть пор заполняется зернами Al. В таком случае один из физических механизмов реализации влияния легкого компонента (Al) материала оболочки на пробивное действие КС следующий: при постепенном увеличении доли Al в смеси не только уменьшается плотность материала, но и постепенно снижается пористость в результате заполнения порового пространства в медной матрице оболочки зернами Al (табл. 4). В чисто алюминиевых облицовках пористость материала не превышала  $8 \div 10$  %, в отличие от чисто медных, в которых пористость материала в зависимости от калибра заряда изменялась от 26 до 31 % (см. табл. 2). На основании результатов исследований [7] можно утверждать, что в случае кумулятивного течения такого материала глубина пробития уменьша-

Таблица 4  
Эффективность кумулятивного пробития зарядом ЗКМ-38 с облицовкой из разных материалов

Материал облицовки, %	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	$m$	$l$ , мм	$d_1$ , мм	$d_2$ , мм*
Al—Cu:					
0/100	6.47	1.38	123	9	13
20/80	4.81	1.27	75	13	17.5
30/70	4.29	1.23	70	13.5	18.5
50/50	3.52	1.18	47	14.5	19.5
70/30	2.99	1.14	42	15	20
80/20	2.78	1.13	37	15.5	20.5
100/0	2.43	1.11	35	16	21
Al—W:					
80/20	—	—	75	10.5	14.3
60/40	—	—	79	10.0	12.5
40/60	—	—	91	8.5	11.5
20/80	—	—	120	6.0	7.5

\* $d_2$  — диаметр отверстия в верхней пластине АМЦ-Н.

ется при уменьшении пористости  $m$  от  $\approx 1.5$  до 1.1 за счет снижения разогрева материала при схлопывании оболочки. Если монолитная и пористая КС одинаковой плотности, то согласно [8] при равных размерах и массе пористой и монолитной КС не только уменьшается глубина пробития, но и увеличивается диаметр отверстия. Исходя из полученных экспериментальных результатов, можно предположить, что в КС из Cu—Al, W—Al (см. ниже) формируется вторичная пористость из-за разности свойств компонентов смеси, что и приводит к уменьшению диаметра по мере увеличения доли тяжелого компонента. Увеличение диаметра отверстия также может быть вызвано радиальным рассеянием струи [4], механизм которого предложен в [9].

Несмотря на то, что сжимаемости Cu и Al отличаются не более чем в два раза, совместное действие повышенной потенциальной энергии объемного деформирования более сжимаемого компонента (Al) и потенциальной энергии расширения внутривоздуха, содержание которого в материале облицовки изменяется от  $\approx 26$  % (чистая медь) до  $\approx 11 \div 12$  % (чистый алюминий), является запускаящим механизмом радиального расхождения материала в



КС, усиливающегося с ростом содержания Al.

Описанный эффект наблюдается в опытах с зарядами с оболочкой другой геометрии (см. табл. 1).

Можно предположить, что зависимости размеров отверстий от содержания алюминия для зарядов других геометрий будут аналогичными, отличающимися только углами наклона к осям координат (см. рис. 7). Описанный эффект будет проявляться и для других материалов, например W—Al, в случае выполнения соотношения между размерами фракций тяжелого и легкого компонентов (см. рис. 7).

### ВЫВОДЫ

1. С уменьшением пористости в диапазоне  $3.2 \div 1.35$  и увеличением плотности гомогенных и композитных кумулятивных облицовок в диапазоне  $2.78 \div 12.24 \text{ г/см}^3$  фокусное расстояние заряда увеличивается с  $(0.4 \div 1)d_c$  до  $(1 \div 2)d_c$ .

2. Наибольшая глубина пробития металлических преград кумулятивными зарядами с пористыми облицовками, изготовленными по технологии одностороннего холодного прессования, при средней пористости  $22 \div 31 \%$  наблюдается в диапазоне размеров фракций исходного порошка  $60 \div 160 \text{ мкм}$ , при этом предпочтительной формой зерен исходного материала является сферическая или сфероидная.

3. Экспериментально установлены зависимости параметров пробития преград от содержания алюминия в материале облицовок из порошковых прессованных композитов Cu—Al, W—Al в диапазоне пористости  $1.1 \div 1.5$ . Показано, что глубина пробития металлических преград в первом приближении линейно возрастает, а диаметр входного отверстия линейно уменьшается при снижении содержания алюминия в материале облицовки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Михалюк А. В., Писарев Ю. А. Механическое действие газокумулятивных зарядов в горных породах // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 5. — С. 123–125.
2. Михалюк А. В., Паршуков П. А. Эффективность зарядов различных конструкций при разрушении горных пород контактным взрывом // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 5. — С. 130–135.
3. Васюков В. И., Дильдин Ю. М., Ладов С. В. Определение параметров гидродинамических полей давления и скоростей при подводном взрыве в безграничной жидкости // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана — № 312. — С. 71–83.
4. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2004.
5. Нгуен Минь Туан. Исследование научно-технических проблем эффекта кумуляции в зарядах малого и сверхмалого диаметра: автореф. дис... канд. техн. наук. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2007.
6. Шакиров Р. А. Сертификация или бизнес-проект? // Каротажник. Науч.-техн. вестн. — 2010. — № 1 (190). — С. 136–154.
7. Тришин Ю. А., Кинеловский С. А. О влиянии пористости на кумулятивное течение // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 122–132.
8. Федоров С. В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперскоростном взаимодействии // Журн. техн. физики. — 2007. — Т. 77, вып. 10. — С. 131–134.
9. 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 capability // Proc. 25th Intern. Symp. on Ballistics. — Beijing, China, 2010. — V. 2. — P. 959–966.
10. 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. 19th Intern. Symp. on Ballistics. — Interlaken, Switzerland, 2001. — P. 1479–1487.
11. Быков Ю. А., Воркина Т. Е. Разработка материалов для беспестовых порошковых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 1994. — № 1. — С. 25–31.
12. Епифанцева Т. А. Экспериментальный и теоретический анализ распределения плотности порошкового гетерогенного материала в прессовках конусной формы // Науч. заметки / Луцк. нац. техн. ун-т. — Электронное науч. изд-во. — 2009. — Вып. 25, т. 2. — С. 90–94.

Поступила в редакцию 29/VII 2010 г.,  
в окончательном варианте — 23/V 2012 г.