

УДК 622.235.5:622.26

Ю.И. Войтенко, д.т.н., главный науч. сотрудник (Украинский государственный геологоразведочный институт), **В.П. Бугаец**, заместитель директора (Научно-инженерный центр «Материалобработка взрывом» Института электросварки им. Е.О. Патона)

ВЛИЯНИЕ АЛЮМИНИЯ НА УДАРНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

Y.I. Voitenko (Ukrainian State Geological Prospecting Institute), **V.P. Bugaiets** (Explosive Materials Processing Research and Scientific Center, Paton Institute of Electric Welding. National Academy of Sciences of Ukraine)

EFFECT OF ALUMINUM ON IMPACT PROPERTIES OF COMPOSITE CUMULATIVE JETS

В статье представлены экспериментальные данные и дано сравнение объема образующегося кратера в металле при взрывах устройств кумулятивного действия различной конструкции: кумулятивного заряда со сплошной облицовкой, кумулятивного заряда с пористой облицовкой, газокумулятивного заряда. Приведены зависимости объема образующегося кратера в металле от содержания мелкодисперсного алюминия в составе пористой кумулятивной облицовки. Определен механизм, согласно которому с увеличением количества алюминия происходит дополнительное выделение энергии при ударе композитной кумулятивной струи по преграде.

Ключевые слова: детонация; кумулятивный заряд; кумулятивная облицовка; газокумулятивный заряд; объем кратера.

У статті представлені експериментальні дані і дано порівняння об'єму утворюваного кратера в металі при вибухах пристроїв кумулятивного дії різної конструкції: кумулятивного заряду із суцільним облицюванням, кумулятивного заряду з пористим облицюванням, газокумулятивного заряду. Наведено залежності об'єму утворюваного кратера в металі від вмісту дрібнодисперсного алюмінію в складі пористого кумулятивного облицювання. Визначено механізм, згідно з яким зі збільшенням кількості алюмінію відбувається додаткове виділення енергії при ударі композитного кумулятивного струменя по перешкоді.

Ключові слова: детонація; кумулятивний заряд; кумулятивне облицювання; газокумулятивний заряд; об'єм кратера.

The purpose of this work - update mechanism for increasing the volume of the channel with increasing aluminum content in the composite shaped charge jet and a comparative analysis of the effectiveness of known cumulative devices for criterion of maximum volume of the cavity in metal targets.

The experiments were performed using the following techniques: measuring the target penetration parameters (depth and volume of the channel formed); the study of interaction products

of shaped charge jets of porous liners (Al, Cu-Al) with a steel targets was performed by electron microscopy, electron microprobe and x-ray phase analysis using a scanning electron microscope REM -106, energy dispersive spectrometer and systems for x-ray phase analysis DRON -4-07.

The paper presents the experimental data and a comparison between the volume of the channel formed in the metal targets explosions devices shaped charge effect of various designs of some explosives (RDX and HMX): a shaped charge with a solid liners, shaped charge with a porous liners and in tubular charge of explosive. Shows the dependence of the volume of the channel formed in the metal targets as a function of content of aluminum powder as part of the porous liners.

Keywords: *detonation; shaped charge; liner; tubular charge of explosive; the volume of the channel.*

Введение. Одним из основных параметров, характеризующих эффективность работы кумулятивных устройств (КУ), считается глубина пробития. Однако в некоторых практических приложениях кроме глубины пробития имеет значение объем образующегося канала V и размер зоны разрушения материала вокруг него. Это относится к задачам вскрытия нефтяных и газоконденсатных пластов, а также к задачам реконструкции строительных и других промышленных объектов с помощью кумулятивного и газокумулятивного взрыва [1-8]. Объему кратера при кумулятивном взрыве уделялось недостаточное внимание.

Эффективность разрушения горных пород применительно к задаче проходки горных выработок сплошными, кумулятивными и газокумулятивными зарядами исследована в работе [1]. Показано, что размер области разрушения увеличивается с ростом скорости детонации и является максимальным в случае газокумулятивного взрыва. Глубина кумулятивных отверстий при взрывании зарядов гексогена со сплошной медной кумулятивной облицовкой в граните с прочностью на одноосное сжатие 167 - 259 МПа составляет $(0,75 - 1)d_c$ (d_c – калибр заряда).

Процессы формирования пористых композитов, изготовленных из порошков вольфрама и меди, исследованы в работе [2]. Выявлено влияние соотношения размеров частиц матрица – включение ($R(Cu)/R(W)$) при фиксированном содержании вольфрама и смеси на структуру и физико-механические свойства. В частности с увеличением этого значения прочность материала увеличивается. Рекомендованное соотношение размеров частиц матрица/включение в исследованном гетерогенном материале составляет $R(Cu)/R(W) = 10$, что позволит увеличить эффективность действия кумулятивного заряда.

В статье [3] показано, что при увеличении доли алюминия в составе пористой кумулятивной облицовки из меди с Al и из вольфрама с Al диаметр кратера увеличивается, а глубина уменьшается в первом приближении по линейному закону. Наибольшая глубина пробития металлических преград кумулятивными зарядами с пористыми кумулятивными облицовками (КО) при средней пористости КО 22 ÷ 31 % наблюдается в диапазоне размеров фракций исходного порошка 60 ÷ 160 мкм, при этом предпочтительной формой зерен исходного материала является сферическая или сфероидная. Пористые КО

позволяют получить более глубокие каналы, чем КО из того же сплошного металла [3,8].

В работе [5] описано поведение в свободном полете композитной кумулятивной струи (КС) из пористой КО и влияние физико-механических свойств компонент на проникание КС в преграду применительно к задачам бронепробития. Отмечено влияние сильно сжимаемых компонент, в том числе внутривоздуха на глубину пробития.

В работе [6] показано, что динамическое сопротивление внедрению кумулятивной струи из сплошного металла практически совпадает со статической твердостью металла по Бринеллю. Поэтому из физических соображений можно предположить, что существует определенная зависимость объема канала от твердости преграды по Бринеллю $V(H_B)$ для кумулятивных зарядов с пористыми КО. В какой-то мере об этом свидетельствует постепенное увеличение входного диаметра в преградах: сталь – медь – алюминий – цинк – свинец при проникании сплошных медных, алюминиевых и стальных струй [7].

Цель настоящей работы – уточнение механизма увеличения объема кратера при увеличении содержания алюминия в композитной кумулятивной струе и сравнительный анализ эффективности КУ по критерию максимального объема полости в преграде.

Для анализа использовались экспериментальные и расчетные данные из работ [8, 9], а также авторские результаты исследований.

Методика экспериментов. Эксперименты с кумулятивными зарядами проводились по известной методике [3]. Заряд гексогена массой 10 г, закрытый крышкой, устанавливался непосредственно на преграду, которая состояла из стальной пластины (ст. 3) толщиной 10 мм, расположенной сверху и материала основной преграды: сталь ст. 3, алюминиевый сплав АМЦ-н, цинк, а также отдельно на преградах из цинка и АМЦ-н. Заряд подрывался электродетонатором через отрезок детонирующего шнура [4]. Расстояние от заряда до первой преграды (крышка заряда) – 13,1 мм. Внутренний угол конической облицовки заряда – 55° , внешний – 60° .

В качестве материала для конической КО были использованы порошки Al (1 – 50 мкм), Cu (60 – 160 мкм), Pb (1 – 40 мкм), W (50 – 160 мкм) и их смеси: Cu-Al, W- Cu- Pb и W- Cu- Pb- Al. Базовый композит W- Cu- Pb содержал следующее количество компонентов (% по массе): 70-20-10. Экспериментальные композиты дополнены Al в количестве 0 – 30 % (по массе).

Облицовки прессовали на гидравлическом прессе с одинаковыми давлениями. Данные о пористости (абсолютной P и относительной m использованных материалов приведены в работах [3, 10] и представлены в табл.1.

Нижние значения приведенных диапазонов соответствуют пористости в вершинах КО, верхние – в основаниях КО. Пористость материала КО вдоль образующей имеет промежуточные значения [10].

Таблица 1

Пористость и значение параметра, характеризующего ход адиабат Гюгонио

| Материал | П, % | m | $2/\Gamma+1$ | p, ГПа |
|------------|-------|-------------|--------------|------------|
| Cu- Pb | 11-28 | 1,12 – 1,38 | 2,06 – 2,17 | 7,5 – 91,1 |
| Al | 7-14 | 1,09 – 1,16 | 2,0 – 2,56 | 4,2 – 58,2 |
| W-Cu-Pb | 19-35 | 1,24 – 1,53 | | |
| Cu-Al | 7-28 | 1,09 – 1,38 | | |
| W-Cu-Pb-Al | 10-35 | 1,12 – 1,53 | | |

Кроме того, в таблице 1 приведены значения параметра $2/\Gamma+1$, где Γ – коэффициент Грюнайзена, p – давление ударного сжатия. Как известно, значение параметра $2/\Gamma+1$ характеризует процесс ударного сжатия. При $m > 2/\Gamma+1$ наблюдается аномальный ход адиабат Гюгонио, при $m < 2/\Gamma+1$ – нормальный ход [11]. Значения коэффициента Грюнайзена для меди и алюминия в зависимости от давления взяты из монографии [12]. Сравнение пористости m с параметром $2/\Gamma+1$ показывает, что сжатие гомогенных и смесевых пористых материалов должно происходить по нормальному ходу ударных адиабат. Это подтверждает вид ударных адиабат пористой меди для $m < 2$ [12]. Для оценки погрешности измерений опыты проводились на 6-ти идентичных объектах. Объем кратера измерялся с помощью мерной бюретки и медного порошка. Статистический разброс объема каверны при штатном срабатывании заряда не превышал 12–13%.

Исследование продуктов взаимодействия КС из пористого КО (Al, Cu-Al) с преградой из АМЦ-н проводили методом электронной микроскопии, микрозондового и рентгенофазного анализов с применением растрового электронного микроскопа РЭМ-106, дисперсионного энергетического спектрометра и установки для рентгенофазного анализа ДРОН -4-07.

Результаты исследования. На рис. 1 показана зависимость $1/V(H_B)$ для заряда с алюминиевой пористой КО, полученная на преградах из пяти металлических материалов, перечисленных выше. Она в какой-то мере подтверждает сформулированное выше предположение. Твердость материала преграды “Ст 3 – Zn” и “Ст 3 – АМЦ - н” рассчитывалась как среднее арифметическое от твердостей различных составляющих.

Более полную информацию, характеризующую эффективность кумулятивных устройств содержит таблица 2. В ней приняты следующие обозначения: V_{exp} – объем ВВ в КУ; V – объем полости в металлической преграде; ρ_{exp} – плотность ВВ в КУ; D – скорость детонации; H_B – твердость материала преграды по Бринеллю (справочные данные); L – глубина пробития; КЗ (с) – кумулятивный заряд с конической КО из сплошного материала; КЗ (п) – кумулятивный заряд с конической КО из пористого материала; ГКЗ – газокумулятивный заряд с кумулятивной полостью в виде цилиндра.

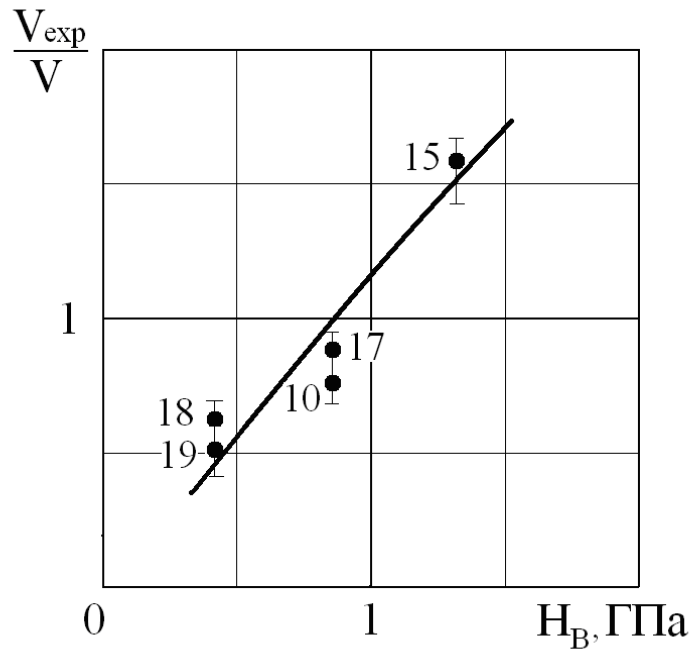


Рис. 1. Зависимость отношения объема ВВ к объему кратера V_{exp}/V от твердости преграды по Бринеллю для пористой алюминиевой КО

Энергия кумулятивного течения при взрыве мелкокалиберных кумулятивных зарядов массой 10 г может быть оценена величиной $\sim 22,6$ кДж, крупнокалиберных КЗ массой 1 кг - ~ 2260 кДж. Последние две оценочные величины получены, исходя из допущения, что на кумулятивную струю расходуется около 40% энергии заряда. Базовый результат, который показывает влияние пористости на результат кратерообразования, показан в строках таблицы 2 №5 и №6: объем кратера при внедрении пористой КС из Al на 44-48 % больше, чем при внедрении КС из сплошного материала. Для оценочного сравнения можно использовать также результат, приведенный в монографии [12]: КО из Al, мишень из стали Ст. 45, масса ВВ 9 г. Глубина пробития – 16 мм, диаметр - 10 мм. Для таких габаритов и, например, параболической формы канала его объем составит $\approx 0,63$ см³. Даже с учетом влияния твердости мишени по Бринеллю (рис. 1) полученное значение меньше, чем при ударе пористой КС из Al по стали Ст. 3. Сравнивая отношение объема ВВ в заряде V_{exp} к объему образующейся полости в металлической преграде V , можно убедиться, что эффективность возрастает в первом приближении от газокумулятивных зарядов и кумулятивных зарядов со сплошной облицовкой к КЗ с пористыми облицовками и далее к КЗ, содержащими Al. Высокая эффективность газокумулятивных зарядов отмечалась и при исследовании разрушения хрупких материалов [1]. Естественно, что результат по действию ГКЗ на преграду, полученный в работе [9], требует экспериментальной проверки. Эффективность ГКЗ обеспечивается высокой плотностью (до 0,2 г/см³) и скоростью газовой кумулятивной струи, которая превышает скорость движения металлических кумулятивных струй (КС) как при метании сплошных, так и пористых лайнеров

в 1,5 – 2,0 раза [4]. А поскольку давление на преграду пропорционально квадрату скорости, то это объясняет достаточно высокую эффективность действия газокумулятивных зарядов не только на хрупкие, но и на металлические преграды (табл. 2).

Для приведенных детонационных характеристик ВВ наибольшей эффективностью характеризуются КЗ с пористыми облицовками, содержащими Al. При ударе пористой кумулятивной струи в ней возникает присоединенная ударная волна (УВ), поскольку скорость точки контакта больше чем скорость звука в ударнике. В предположении о равенстве плотности материала в КО и КС эта величина равна примерно 630 – 1300 м/с при пористости 23% и 3035 – 4272 м/с в этом же веществе при пористости 1 - 10 % (композит W- Cu (20 – 50% W по массе))[13]. В процессе растяжения струи пористость увеличивается и достигает ~80 – 90% согласно рентгенограммам из работы [14].

В случае, если КС состоит из материалов, резко отличающихся по физико-механическим свойствам, пористое вещество при растяжении КС превращается в поток частиц. Скорость звука при кумулятивном течении пористого вещества определяется, как скорость прохождения акустического сигнала по веществу, пока есть контакты между зернами, или их конгломератами. Если же КС растягивается до состояния расплывшихся частиц, то скорость звука в такой среде определяется по законам газовой динамики и механики многофазных сред, например, с использованием результатов работы [15]. Давление между фронтом УВ и точкой контакта в пористой КС выше, чем на границе сплошной КС и преграды, поскольку ударные адиабаты пористых материалов лежат выше, чем сплошных [12].

Таким образом, по критерию максимального объема кратера в металлической преграде, кумулятивные заряды с пористыми облицовками, содержащими Al, по крайней в части малогабаритных зарядов являются наиболее эффективными из всех перечисленных выше КУ. На рис. 2 показаны зависимости объема кратера от содержания Al в композите Cu-Al (кривая 1) и W-Cu-Pb-Al (кривая 2). Внизу показано изменение плотности смеси ρ_{00} Cu-Al (верхняя шкала плотности) и W-Cu-Pb-Al (нижняя шкала плотности). При определенных соотношениях компонент смеси обеспечивается не только повышенный объем кратера, но и достаточно большая глубина канала (табл. 2). Несмотря на то, что композитная КС на основе вольфрама обеспечивает большую (на $\approx 20 - 35\%$) глубину пробития стальных и комбинированных преград, чем КС из композита Cu-Al, в некоторых приложениях, где требуется больший объем канала, более предпочтительным является композит Cu-Al, или чистый Al (рис. 2). Объем кратера, образованного композитной струей Cu-Al, на $\approx 60 - 90\%$ превышает объем кратера, получаемого струей W-Cu-Pb-Al.

Таблица 2
Характеристики материалов и результаты пробития преград кумулятивными и газоккумулятивными струями

| № п/п | Тип устройства -ва | ВВ | V_{exp} см | V_3 см ³ | Материал преграды | H_v преграды, ГПа | V_{exp}/V | P_{exp} кг/м ³ | D, м/с | Материал облицовки | L, мм |
|-------|--------------------|------------------------|--------------|-----------------------|-------------------|---------------------|--------------|-----------------------------|----------------|--------------------|---------|
| 1 | КЗ (с) [8] | Гексоген клас. литье | 598 | 190 | Ст37 | 1,79 | 3,15 | 1675 - 1705 | 7800 | Cu | - |
| 2 | КЗ (с) [8] | Гексоген вибрац. литье | 598 | 240 | Ст37 | 1,79 | 2,49 | 1770 - 1780 | 8400 - 8450 | Cu | - |
| 3 | КЗ (с) [8] | Октоген вибрац. литье | 598 | 275 | Ст37 | 1,79 | 2,17 | - | - | Cu | - |
| 4 | КЗ (п) | Гексоген флегм. (ГФ) | 6,0 | 7,4 | Ст3-АМЦ-н | 1,31/0,3 - 0,55 | 0,81 | 1667 | 8100 - 8400[8] | Cu | 123 |
| 5 | КЗ (с) | Окфол | 6,0 | 4,2 | Ст3-АМЦ-н | 1,31/0,3-0,55 | 1,43 | 1760 | 8500 - 8700 | Al | 32 |
| 6 | КЗ (п) | Окфол, ГФ | 6,0 | 7,6-8,0 | Ст3-АМЦ-н | 1,31/0,3-0,55 | 0,79; 0,75 | 1760; 1667 | 8100 - 8700 | Al | 35-40 |
| 7 | КЗ (п) | ГФ | 6,0 | 9,0 - 11,0 | Ст3-АМЦ-н | 1,31/0,3-0,55 | 0,55 - 0,66* | 1667 | 8100 - 8400 | Cu-Al | 75-87 |
| 8 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 4,36 | Ст3-АМЦ-н | 1,31/0,3-0,55 | 1,38 | 1667 | 8100 - 8400 | W-Cu-Pb | 188 |
| 9 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 4,2 - 6,5 | Ст3-АМЦ-н | 1,31/0,3-0,55 | 0,92 - 1,43* | 1667 | 8100 - 8400 | W-Cu-Pb-Al | 145-165 |
| 9 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 2,7-3,2 | Ст3 | 1,31 | 2,26 | 1667 | 8100 - 8400 | Cu | 63 |
| 10 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 3,07 | Ст3 | 1,31 | 1,62 | 1667 | 8100 - 8400 | Al | 20 |
| 11 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 1,52 | Ст3 | 1,31 | 3,95 | 1667 | 8100 - 8400 | W-Cu-Pb | 102 |
| 12 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 7,01 | Ст3-Zn | 1,31/0,412 | 0,86 | 1667 | 8100 - 8400 | Al | 34 |
| 13 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 8,82 | Zn | 0,412 | 0,68 | 1667 | 8100 - 8400 | Al | 40 |
| 14 | КЗ (п) | "- | 6,0 | 10,71 | АМЦ-н | 0,3 - 0,55 | 0,56 | 1667 | 8100 - 8400 | Al | 52 |
| 15 | ГКЗ [9] | - | 72 | 37,6 | Ст20** | 1,56-1,63 | 1,92 | 1520 | 7800 | - | - |

* Диапазон содержания Al соответствует максимальному значению V (рис. 2)

** Преграда толщиной 30 мм на грунтовом основании

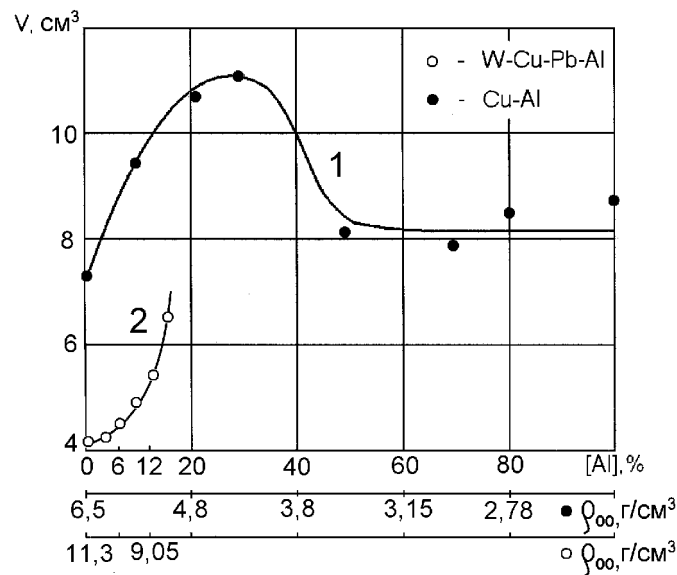


Рис. 2. Зависимость объема кратера в преграде Ст.3 – АМЦ-н от содержания Al в композитах Cu-Al (кривая 1) и W-Cu-Pb-Al (кривая 2)

Механизм увеличения размеров кратера с увеличением содержания Al в материале КО описан в работах [3, 5] и сводится преимущественно к дополнительному энерговыделению при высвобождении потенциальной энергии ударно сжатого Al и внутрипорового воздуха, а также при частичном окислении Al в ходе схлопывания КО.

Однако этот механизм можно дополнить следующим. Дополнительное выделение энергии в зоне взаимодействия КС с преградой происходит по механизму микроочаговых и макроочаговых тепловых взрывов смеси Cu-Al размеры которых и величина дополнительной энергии увеличивается с увеличением доли Al в смесях Cu-Al, W-Cu-Pb-Al. Тепловой взрыв металлических смесей Ni-Al, Nb-Al, Ti-Al, Ti-Ni, Cu-Al достаточно подробно описан в литературе, например в [16 - 18]. Механизмы взаимодействия металлов в макрообъеме сводятся к образованию интерметаллидов, например, NiAl₃, Ni₂Al₃ и NiAl с выделением дополнительной теплоты для образования каждого из указанных соединений [17]. Независимо от темпа линейного нагрева смеси Cu-Al при достижении температуры $T=640^{\circ}\text{C}$ наблюдается скачкообразный рост саморазогрева и резкое увеличение скорости взаимодействия. То же самое для смеси Nb-Al при температуре $\sim 1040^{\circ}\text{K}$ [16]. Во время теплового взрыва образцы увеличивались в размерах, затем при остывании размеры уменьшались [18].

Температура в зоне взаимодействия КС с преградой значительно превышает приведенное значение. Для оценки этой температуры и состава был исследован материал, выброшенный из кратера, а также материал со стенки кратера. Материал представляет собой вспененную застывшую, пятнистую смесь Al и Fe с содержанием железа в алюминии от $\sim 1,5\%$ до $\sim 56,2\%$ (по объему) (рис. 3). В других образцах были примеси Cu в количестве 1,97 – 29,60%. Исследование продуктов взаимодействия КС из пористого КО (Al, Cu-

Al) и стальной преграды с помощью микронзондового анализа показали наличие отдельных композитных (Fe – Cu - Al, Al – Fe – Cu, Fe – Si - Al в порядке возрастания количества) частиц идеальной сферической формы диаметром ~ 1 – 2,5 мкм, свидетельствующее о частичном испарении и последующей конденсации железа, меди и алюминия и примесей (Si, K и др.) (рис 4). Это позволяет оценить температуру в зоне взаимодействия величиной ~ 2735°C (температура испарения железа) и 2877°C (температура испарения меди).

На рис. 5 показана дифрактограмма продуктов взаимодействия композитной струи Cu-Al (80-20% масс.) с преградой из АМЦ-н, которая прямо подтверждает в составе этих продуктов интерметаллида CuAl_2 . При этом согласно [18] выделяется тепло в количестве ~330 кДж/моль. Дополнительное выделение энергии при проникании кумулятивных струй из пористых КО, содержащих Al, приводит к увеличению степени пластической деформации и большему выбросу материала преграды из кратера.

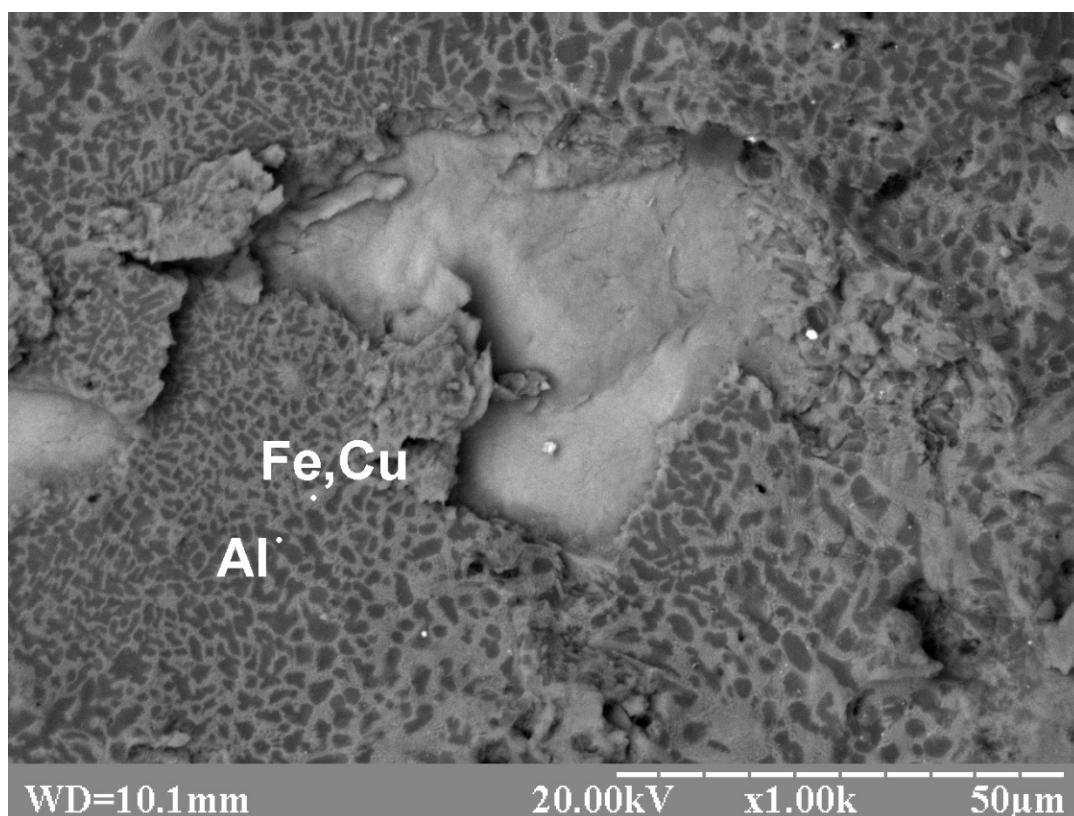


Рис. 3. Морфология материала, выброшенного из кратера

Случайные зерна W наблюдались в застывшей смеси Al – Fe без изменений. Поэтому температура в очаге взаимодействия, по-видимому, не достигает температуры плавления W (~3410 - 3680° K), W не взаимодействует с остальными компонентами струи и преграды с образованием интерметаллидов, и поэтому тепловой эффект при проникании струй W-Cu-Pb-Al (W-Al [3]) в преграду ниже, чем при проникании струй Cu-Al. Это объясняет положение кривой 2 относительно кривой 1 (рис 2). Кривая 2 при дальнейшем увеличении содержания Al должна выйти на плато, на которое вышла кривая 1.

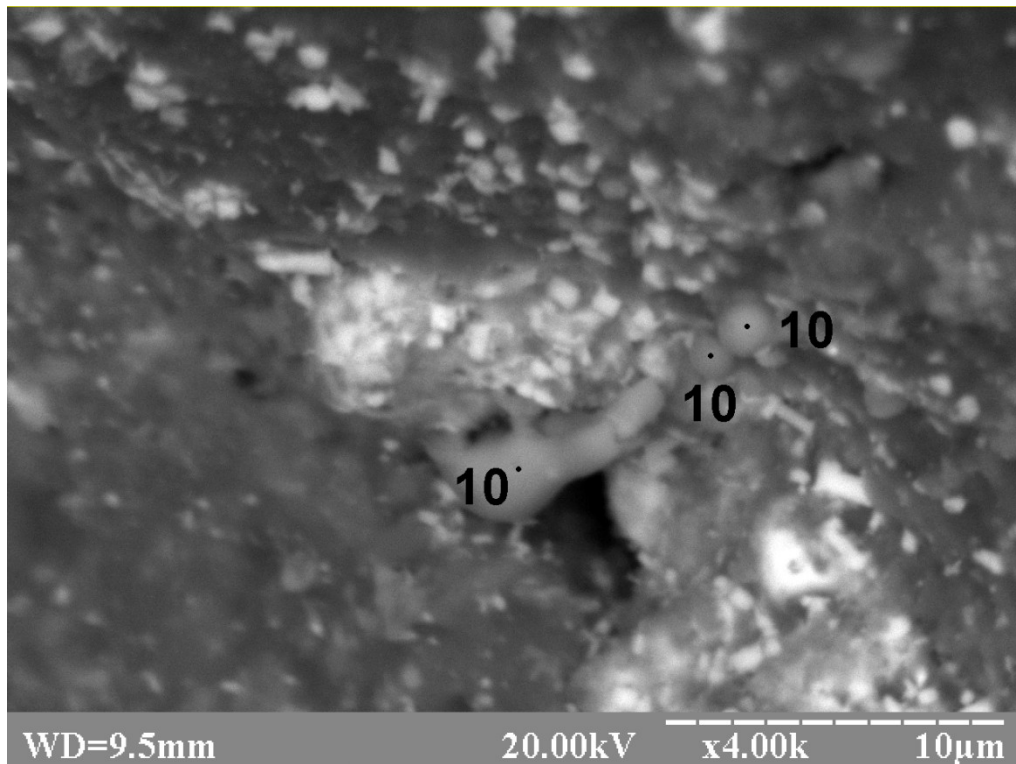


Рис. 4. Морфология материала, выброшенного из кратера (10 – Fe-Cu-Al) (в порядке уменьшения количества компонента)

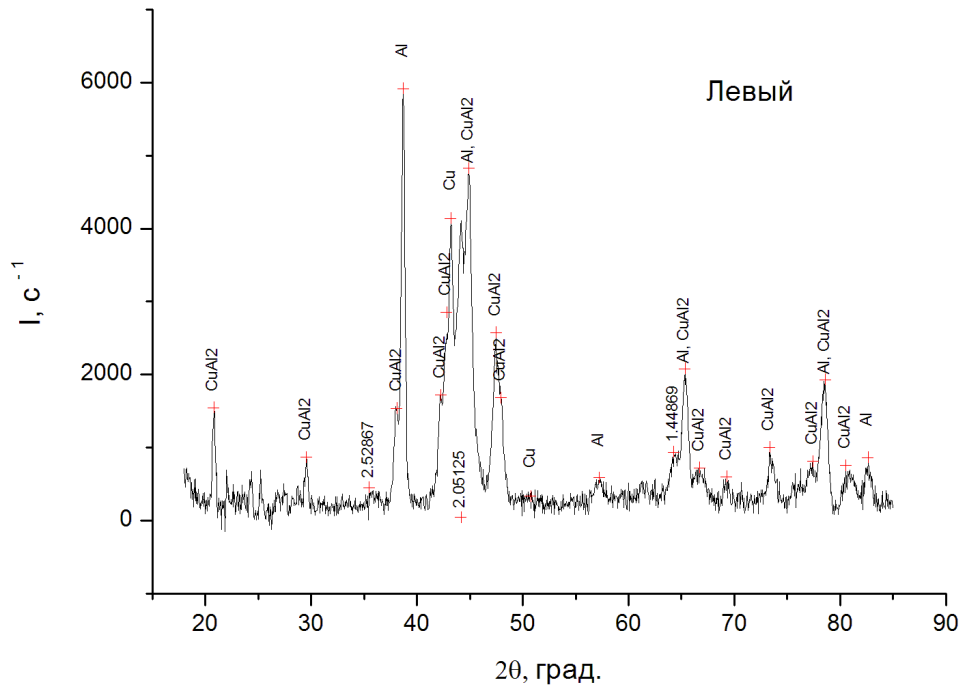


Рис. 5. Дифрактограмма материала, образованного при взаимодействии струи из Cu-Al с преградой АМЦ-н

Случайные зерна W наблюдались в застывшей смеси Al – Fe без изменений. Поэтому температура в очаге взаимодействия, по-видимому, не

достигает температуры плавления W (~3410 - 3680° K), W не взаимодействует с остальными компонентами струи и преграды с образованием интерметаллидов, и поэтому тепловой эффект при проникании струй W-Cu-Pb-Al (W-Al [3]) в преграду ниже, чем при проникании струй Cu-Al. Это объясняет положение кривой 2 относительно кривой 1 (рис 2). Кривая 2 при дальнейшем увеличении содержания Al должна выйти на плато, на которое вышла кривая 1.

Отдельные опыты со смесями Ni-Al (Al 9 % по массе) и Ni- Pb (Pb 5 % по массе) показали превышение объема канала при использовании первой смеси по сравнению со второй на 0,6 см³ в мишени Ст. 3 – АМЦ - н. Таким образом, использование Al в составе композитов при изготовлении пористых облицовок КЗ обеспечивает формирование необходимых инженерных свойств материалов для кумулятивных зарядов.

Авторы благодарят Ковтуна А. В. и Горникова Ю.И. за помощь в проведении экспериментов.

Выводы

1. Величина обратная объему образующейся полости в металле при ударе кумулятивной струи в первом приближении пропорциональна статической прочности материала по Бринеллю.

2. Наибольшей разрушающей и деформирующей способностью отличаются кумулятивные заряды с пористыми композитными облицовками на основе меди, свинца и вольфрама с добавкой мелкозернистого (1 – 50 мкм) Al в количестве 10 – 30% по массе в результате дополнительного выделения энергии при взаимодействии Al с другими компонентами материала струи. При этом объем кратера в преграде при проникании струй Cu-Al примерно на 60 – 90% превышает объем кратера, получаемого струями W-Cu-Pb-Al. Оптимальным количеством Al для промышленных зарядов, которое обеспечивает заметное увеличение объема канала при незначительном снижении пробивной способности, является 6 -10 % по массе.

3. Одним из источников дополнительной энергии в процессе ударного проникания КС в преграду являются экзотермические реакции между Al и другими металлами (Cu, Ni) с образованием интерметаллидов.

Список использованных источников

1. Михалюк, А.В. Эффективность зарядов разных конструкций при разрушении горных пород контактным взрывом [Текст] / А.В.Михалюк, П.А.Паршуков //Физика горения и взрыва. – 1998. – т.34. - № 5. – С. 130 – 135.

2. Епіфанцева, Т.А. Вплив співвідношення розмірів частинок компонентів суміші на структуру і властивості пресовок гетерогенного матеріалу Cu-20% (мас.) W [Текст] / Т.А. Епіфанцева, А.Ю. Коваль, В.В. Скороход, М.Б. Штерн //Мікроскопія та міцність матеріалів. – 2012. - № 18. – С. 127 – 138.

3. Войтенко, Ю.И. Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками [Текст] / Ю.И.Войтенко, С.В.Гошовский, А.Г.Драчук, В.П. Бугаец // Физика горения и взрыва. – 2013. - № 1. - С. 125 – 131
4. Прууэл, Э.Р. Поле течения продуктов взрыва трубчатого заряда ВВ [Текст] / Э.Р. Прууэл, Л. А.Мержиевский, К.А.Тен и др.// Тр. Межд. Конф. «Харитоновские тематические научные чтения». Под.ред А.Л. Михайлова. - Саров: ВНИИЭФ, 2009. - С. 430-435.
5. Babkin, A.V. Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped-charge jet free flight behavior and its penetration capability [Text] / A.V. Babkin, S.V.Ladov, S.V. Fedorov //Proc. 25th Int. Symp. on Ballistics. — Beijing, China – 2010.- V.2. - P. 959-966.
6. Румянцев, Б.В. Механизмы проявления прочности при высокоскоростном внедрении металлических струй в металлы и хрупкие материалы [Текст] / Б.В. Румянцев // Физика твердого тела. — Т.53. — В. 10. - С. 2018- 2022.
7. Кук, М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. [Текст]/ М.А. Кук; Iresco Semicals. - М.: Недра, 1980. – 453 с.
8. Баум, Ф.А. Физика взрыва. [Текст] / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др.; под ред. Л.П. Орленко; МВТУ им. Н. Баумана – М.: Наука, 1975. – 704с.
9. Абузьяров, М.Х. Моделирование действия газокумулятивных зарядов на преграду [Текст]/ М.Х.Абузьяров, А.В.Кочетков, С.В.Крылов, Е.В.Цветкова// Проблемы прочности и пластичности. – Нижний Новгород: НТУ, 2005. – Вып. 67. – С. 168 – 177.
10. Драчук, О.Г Розрахунок параметрів функціонування кумулятивних зарядів с пористими облицюваннями. [Текст]/ О.Г.Драчук, С.В.Гошовский, Ю.И.Войтенко. - Київ: УкрДГРІ, 2007. – 42 с.
11. Тришин, Ю.А. О влиянии пористости на кумулятивное течение [Текст] /Ю.А. Тришин, С.А. Кинеловский // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т.36, № 2. - С. 122-132.
12. Андреев, С.Г. Физика взрыва [Текст] / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Баум Ф.А. и др.; под ред. Л.П. Орленко; МВТУ им. Н. Баумана - Изд. 3-е, испр. – в 2-х т. Т.2 – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
13. Безіменний, Ю.Г. Дослідження впливу структури композиту на основі мідного порошку з вольфрамівими вкрапленнями на швидкість поширення пружної хвилі [Текст] / Ю.Г Безіменний, Т.О.,Епіфанцева, Є.О.Козирецький // Сборник научных трудов «Вестник НТУ ХПИ»: Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Х: ХПИ.- 2010. - № 12. – С. 148 – 155.
14. Voumard, C. Performances and behavior of WCu- pseudoalloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve [Text] / C.Voumard, H.-P. Roduner, W. Santschi, H.Wister // Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics. — Interlaken: Switzerland.- 2001. - V.1 - P. 1479-1487.

15. Вахненко, В.О. Подібність автомодельних потоків газу і двофазного середовища з нестисливою компонентою [Текст] / В.О. Вахненко //Доповіді НАН України.– 2010. - №12. - С.97 -103.
16. Письменская, Е.Б. Тепловой взрыв в системе ниобий-алюминий. Основные макрокинетические стадии [Текст] / Е.Б.Письменская, А.С.Рогачев, А.С.Бохматов, Н.В.Сачкова // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 30. № 2. – С. 40 – 44.
17. Гаспарян, А.Т. Макрокинетика взаимодействия и тепловой взрыв в смесях порошков Ni и Al [Текст] / А.Т. Гаспарян, А.С. Штейнберг //Физика горения и взрыва. – 1988. – т. 24, № 3. – С. 67 – 74.
18. Письменская, Е.Б. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений в режиме динамического теплового взрыва[Текст]: автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Письменская Елена Борисовна; Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН. -Черноголовка, 2000. 16с.

Статья поступила в редакцию 10.05.2016 г.

УДК 658.562.64:622.3

В.Г. Кравець, д.т.н., проф., НТУУ «КПІ», **О.А. Темченко**, д.т.н., проф., ДВНЗ «Криворізький національний університет», **В.В. Вапнічна**, к.т.н., доц, НТУУ «КПІ», **Г.В. Шиповський**, к.т.н, ст.н.с., провідний інженер технічного відділу ПАТ «ІНГУЛЕЦЬКИЙ ГЗК»

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІРНИЧОТРАНСПОРТНОГО УСТАТКУВАННЯ НА ГЛИБОКИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРАХ

V.H. Kravets, (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»), **O.A. Temchenko**, (State Higher Educational Establishment «Kryvyi Rih National University»), **V.V. Vapnichna** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»), **H.V. Shypovskiy** (PJSC “Ingulets GOK”)

MINING AND HAULAGE EQUIPMENT RELIABILITY STUDY AT DEEP-LEVEL IRON ORE OPEN PITS

На основі аналізу п'ятирічних даних щодо фактичного використання гірничотранспортного устаткування на глибоких кар'єрах Кривбасу (Україна) запропоновано механізм розрахунку технологічної надійності рудопотоків у системі «кар'єр - дробильно-збагачувальна фабрика». Отримані статистичні залежності вказують на те, що найбільш істотний вплив на надійність і економічну ефективність рудопотока чинить робота екскаватора у рудному вибої з урахуванням забезпечення необхідної якості дроблення гірничої маси в кар'єрі. Саме на підвищення надійності цієї ланки повинна бути