УДК 623.451.4.082.5:623.56

ФІЗИЧНІ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БРОНЕПРОБИТТЯ КУМУЛЯТИВНИМИ ЗАРЯДАМИ

Ю. І. Войтенко[1†], Ю. М. Сидоренко[2], В. В. Бойко[1], А. Л. Ган[2], А. М. Пасічник[1], В. П. Бугаєць[3]

[1]*Інститут гідромеханіки НАН України*
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна
[†]*E-mail: voytenkoui@gmail.com*

[2]*Національний технічний університет України*
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Берестейський пр., 37, 03056, Київ, Україна

[3]*Науково-інженерний центр «Матеріалообробка вибухом»*
Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
вул. Богдана Хмельницького, 5, смт Глеваха, 08631,
Фастівський район, Київська обл., Україна

Отримано 24.10.2023

Проаналізовано результати моделювання функціонування кумулятивних зарядів, призначених для формування ударних ядер і подовжених високошвидкісних елементів. З огляду на можливість їх руйнування у вільному польоті через значні градієнти швидкості вздовж елемента, при виборі матеріалів облицювань і проєктуванні зарядів необхідно ретельно підбирати матеріали й, можливо, проводити попередні випробування. Наведено результати чисельного моделювання для двох схем збудження детонації: з точки на осі симетрії та по кільцевому контуру при наявності інертної лінзи. Викладено результати моделювання функціонування кумулятивних зарядів, призначених для формування кумулятивних струменів із різними формами лайнерів і різними схемами збудження детонації. Проведено порівняння розрахункових результатів з даними експериментальних досліджень, одержаними на макетах зарядів. Узагальнено результати експериментів щодо пробиття металевих і комбінованих (метал – бетон, метал – ґрунт) мішеней зарядами різних конструкцій. Розглянуто вплив густини, швидкості звуку та пористості матеріалів облицювань, а також міцності й твердості матеріалів мішені на глибину пробиття. Описано окремі експерименти з вибуховими матеріалами місцевого приготування, які мають низьку швидкість детонації з ефектом кумуляції енергії вибуху. Запропоновано шляхи підвищення ефективності кумулятивних зарядів, зокрема, шляхом використання нових матеріалів, мікроламінатів різних металів, матеріалів з градієнтними властивостями тощо. Отримані висновки можуть бути

На цей документ поширюється дія ліцензії CC-BY-NC-ND 4.0
DOI: https://doi.org/10.15407/jha2024.01.016

корисними при проведенні гуманітарного розмінування й утилізації боєприпасів. Інший напрямок застосування результатів оптимізації форми та матеріалів облицювань кумулятивних виїмок – розробка конструкцій зарядів глибокого пробиття для нафто- і газовидобувної промисловості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кумулятивний заряд, детонація, облицювання, кумулятивний струмінь, ударне ядро

1. ВСТУП

Для проникнення в міцні перепони використовуються різні методи. Традиційним є застосування кумулятивних зарядів (КЗ), в яких енергія вибуху деформує металеве облицювання внутрішньої поверхні заряду і надає йому високу осьову швидкість. Виділяють два види КЗ – снарядоформуючі заряди (СФЗ) і заряди для формування довгих і тонких кумулятивних струменів (КС). КЗ складаються з металевого кумулятивного облицювання (КО), корпусу, проміжного детонатора та заряду вибухової речовини. Залежно від конструктивних параметрів заряду, в результаті його функціонування формується вражаючий елемент — компактне ударне ядро (УЯ), подовжений високошвидкісний елемент (ПВЕ), або КС.

Вражаючі елементи відрізняються один від одного формою. Як правило, ударне ядро характеризується відношенням довжини l до діаметра d, близьким до одиниці. Для подовженого високошвидкісного елемента відношення довжини до діаметра може досягати від 8 до 10 [1–5]. Кумулятивні струмені лежать у діапазоні ще більших l/d, яке на момент розриву може досягати $10 \ldots 200$ [3, 6]. Формування КС відбувається на відстанях $(1 \ldots 2)$ калібру заряду в разі «короткофокусних» виробів і $(4 \ldots 10)$ калібрів при застосуванні «довгофокусних» зарядів.

За останні 15–20 років кількість присвячених дослідженням функціонування КЗ публікацій помітно збільшилась. Насамперед це зумовлено появою програмних продуктів, які дозволяють проводити комп'ютерне моделювання процесу вибуху таких пристроїв [1, 4, 5, 7, 8]. У спеціальній літературі представлено численні результати досліджень щодо вивчення впливу розташування точок збудження детонації, їх кількості, міцності перепони, початкової температури лайнера, швидкості обертання заряду та інших факторів, які впливають на ефективність КЗ, Попри це, досі бракує систематизованих даних про масово-швидкісні параметри КС навіть для найпростіших конфігурацій лайнерів – конуса, сфери, сферичного сегмента й зарядів різних калібрів. У відкритому доступі перебуває лише обмежена кількість публікацій про масово-швидкісні характеристики композитних КС і УЯ, сформованих із різних матеріалів – дво- й тришарових тощо. Виходячи з цього, наведені нижче результати досліджень покликані доповнити наявну базу даних про швидкості, маси КС та глибини пробивання перепон з різними механічними властивостями.

Мета статті полягає в аналізі наявних даних щодо розробки кумулятивних зарядів на прикладах їх використання в різних сферах технічної діяльності, а також результатів авторських досліджень впливу на ефективність КЗ форми, конструкції та нових матеріалів для їхніх облицювань. При цьому, окрім узагальнення відомих результатів досліджень, застосовуються методи чисельного та фізичного моделювання процесів детонації, кумуляції і проникання КС у тверді середовища [8, 9].

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Особливість застосування СФЗ полягає в необхідності влучання високошвидкісного елемента в мішень на великій відстані від точки спрацювання – до 1000 і більше калібрів. Тому, на відміну від облицювань КС, матеріали для отримання ефективних УЯ і ПВЕ мають поєднувати високу пластичність із міцністю при динамічних навантаженнях.

У натурних експериментах нерідко спостерігається руйнування облицювання на етапі польоту до мішені. Одна з головних причин цього полягає в наявності великого градієнта швидкості між головною та хвостовою частиною ПВЕ. Як наслідок виникають значні пластичні деформації та фрагментація облицювання [2,5]. Окрім того, для забезпечення аеродинамічної стабільності в польоті ПВЕ повинен мати у хвостовій частині «спідницю». Проте, щоб забезпечити достатню кінетичну енергію для пробиття перепони, розміри «спідниці» мають бути невеликими.

Пробиття забезпечується ПВЕ видовженої форми з $l/d \geq 3$. У роботі [1] показано, що довжина ПВЕ, який утворюється зі сферо-конічного облицювання, поступово зростає при збільшенні радіуса контуру ініціювання детонації. Так, при радіусі контуру ініціювання, рівному половині калібру заряду, досягається майже десятикратне збільшення довжини ПВЕ. Глибина його проникнення при точковій детонації на осі симетрії досягає 0.65 калібру заряду. Глибина проникнення EFP (explosively formed penetrator) при круговій детонації по контуру з радіусом 1/3 калібру заряду досягає 1.24 калібру, а при радіусі контуру збудження детонації 1/2 калібру заряду, – 1.55 калібру.

2.1. Вплив форми КО

Основний метод керування формою та довжиною ПВЕ і КС – надання належної форми облицюванню. У роботі [2] досліджувалось функціонування зарядів чотирьох конфігурацій (Рис. 1). Тут R_1 – радіус внутрішньої сферичної поверхні; R_2 – радіус зовнішньої сферичної поверхні; r_p – радіус переходу сферичної поверхності в конічну; r_f – радіус краю фаски на сферичній поверхні; δ_1 – товщина облицювання в центрі; δ_2 – товщина облицювання на периферійній ділянці; δ_3 – товщина облицювання на торці конічної поверхні; δ_4 – товщина облицювання на торці фаски. Узагальнюючи результати проведених досліджень, слід відзначити, що найкращі результати щодо створення аеродинамічно стійких ПВЕ показали заряди, які використовують сферо-конічні облицювання та облицювання з розвиненою фаскою з пластичних марок сталі 08кп, 11кп, 11ЮА (див. Рис. 1в, г).

Комбінуючи зміну геометрії облицювання у зазначених напрямках з раціональним вибором їхніх фізико-механічних властивостей, можна отримати надійні аеродинамічно стійкі та досить наповнені ПВЕ, які здатні забезпечити найбільше пробиття. Зокрема, змінюючи механічні характеристики матеріалу облицювання від центру до периферії зі збільшенням динамічної межі плинності від 0.5 ГПа до 0.8 ГПа, можна за рахунок зниження пластичності досягти збільшення «спідниці» у хвостовій частині ПВЕ, яка забезпечує його аеродинамічну стабільність. При зменшенні ж динамічної межі плинності від 0.8 ГПа до 0.65 ГПа збільшується наповненість (суцільність) ПВЕ, що позитивно впливає на його пробивну здатність.

Окрім того, кожна форма облицювання характеризується своїм коефіцієнтом видовження. Подовження ПВЕ зі зменшенням межі плинності збільшується до $l/d = 4 \ldots 6$,

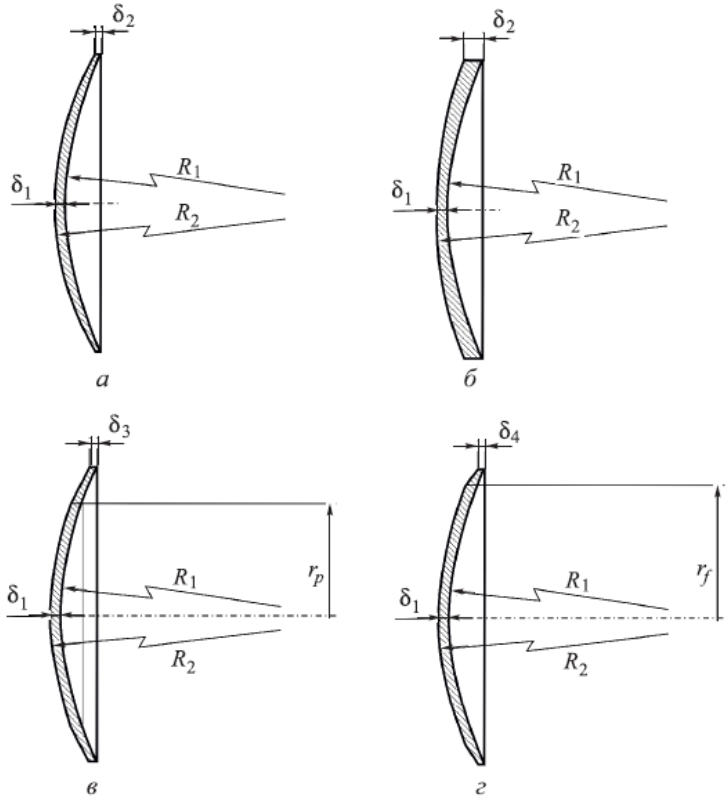

Рис. 1. Варіанти облицювання снарядоформуючих зарядів:
а — дегресивна; *б* — прогресивна; *в* — сферо-конічна; *г* — з конічою фаскою

проте виникає ризик відриву головної частини від хвостової. І навпаки, при збільшенні межі плинності наповненість елемента знижується, що негативно відбивається на його пробивній здатності. У разі малих значень динамічної межі плинності, наприклад, при використанні псевдосплавів із порошкових матеріалів, можливе руйнування ПВЕ в режимі вільного польоту.

Автори статті [7] справедливо відзначають, що залежність між геометрією лайнера та кінцевою формою УЯ дуже складна і не досі була належним чином описана. У цій роботі висловлено цікаву й продуктивну ідею застосування подвійних лайнерів, виконаних з шарів двох матеріалів. Показано, що компактні УЯ з двох матеріалів можна отримати для таких пар матеріалів: сталь SAE 1006 + алюміній 1100-O, сталь SAE 1006 + тефлон, алюміній 2024 T351 + тефлон, алюміній 2024 T351 + нейлон. Швидкості їх руху при детонації ВР (склад В, швидкість детонації $D = 7.98$ км/с) дорівнюють відповідно 1466 м/с і 1692 м/с, 1526 м/с і (1758 ... 1775) м/с, 2403 м/с і (2511 ... 2531) м/с, 2727 м/с і 2867 м/с. Вихідні й мінімальні діаметри каверн в мішені зі сталі 4340 товщиною 20 мм для цих чотирьох пар матеріалів дорівнюють 57 мм і 43.6 мм, 49.8 мм і 38.6 мм, 63.5 мм і 52.6 мм, 61.6 мм і 55.6 мм відповідно. При цьому деякі з них формують достатньо компактні (нерозділені за матеріалами) УЯ. Зауважимо, що пари матеріалів алюміній 2024 T351 + тефлон та алюміній 2024 T351 + нейлон при ударній взаємодії можуть виділяти додаткову енергію, яка впливає на розмір отвору в мішені [9].

Рис. 2. Форми УЯ, які утворюються із різних металів. Верхній ряд справа наліво: середньовуглецева сталь, мідь, тантал; нижній ряд справа наліво: алюміній і армкозалізо

Одна з основних задач при формуванні ПВЕ за допомогою кумулятивних зарядів – збереження його цілісності на етапі польоту до мішені, зважаючи на великий градієнт швидкості між головною та хвостовою частиною ПВЕ й породжені ним значні пластичні деформації, які викликають фрагментацію облицювання. У роботі [2] на основі деформаційного критерію руйнування матеріалу в умовах об'ємного напружено-деформованого стану $\varepsilon = \varepsilon^*$ показано, що матеріал ПВЕ зберігає цілісність при $\varepsilon^* \geq 4$, а при $\varepsilon^* \leq 3$ буде зруйнований. Тут ε – інтенсивність деформацій, $\varepsilon^* = \ln[1/(1-\varphi)]$ (коефіцієнт $= 2$, φ – відносне звуження матеріалу).

Окрім того, на форму ПВЕ впливає матеріал кумулятивного облицювання і його механічні властивості (Рис. 2) [10].

У статті [11] наведено результати експериментальних досліджень ефективності формування та проникнення ПВЕ при підриванні зарядів з КО, виготовлених методом порошкової металургії. Досліджувалось два типи спечених порошкових КО – лайнери у формі сферичних сегментів та конічні лайнери з тупим кутом при вершині 140°. КО були виготовлені з мідного порошку, мали діаметр основи 45 мм і масу 30 г. Густина міді після пресування і спікання була 8.6 г/см^3, густина вибухової речовини в заряді (гексоген + PTFE, 4 %) – 1.8 г/см^3. Вибухові заряди зі спеченими мідними КО досліджувались за допомогою рентгенівської імпульсної техніки та високошвидкісної цифрової камери. Було зафіксовано формування вибухових снарядів і перевірено перфорацію сталевої перепони. Підсумовуючи, зазначимо, що КО для зарядів ПВЕ, виготовлені за технологією порошкової металургії, виявилися повноцінними й ефективно пробивали мішень на відстані до 200 калібрів. Особливість застосування КЗ при формуванні високошвидкісних КС полягає в необхідності збереження цілісності КО на стадії пострілу, у вільному польоті, а також забезпечення максимальної глибини пробиття при ударі по мішені. Тому результати досліджень в роботі [11] вселяють певний оптимізм щодо можливості використання порошкових матеріалів і виробів з них у промислових виробах і технологіях.

У Табл. 1 показано еволюцію зарядів цивільного призначення, які розроблялися в Україні з 1999 р. по 2022 р. і деякі експериментальні дані для зарядів, опубліковані у відкритих джерелах. Тут прийняті такі позначення: 2α – кут при вершині конічного КО;

m_{exp} – маса ВР; F – відстань від заряду до мішені; L/d_c – глибина пробиття в калібрах; d_1/d_c – відносний діаметр отвору вхідного отвору. Перші шість зарядів випробувались на мішенях із пакету пластин зі сталі Ст.3. Детонація всіх зарядів ініціювалася з точки на осі симетрії. В усіх зарядах, за винятком №3 і №7, використовувався флегматизований гексоген. У серії дослідів №7 використовувався октастіт 8 (РВХ з 95% HMX – октоген), а в серії №3 – суміш тротилу і гексогену ТГ 30/70. У серії №3 облицювання було монолітним, а в решті виготовленим з порошкових матеріалів.

Ці дані дозволяють скласти уявлення про вплив основних чинників на глибину пробиття й можуть бути корисними для вибору геометрії основних деталей конструкції заряду й матеріалів облицювання при проєктуванні зарядів цивільного і військового призначення. Очевидно, що для зарядів глибокого пробиття кут при вершині конічного КО(кут при вершині внутрішньої поверхні лайнера) не повинен перевищувати $(42\ldots44)^\circ$. Згідно з роботою [3] стандартний заряд має кут при вершині 42°. Імовірно, що до цього значення наближений має заряд із серії експериментів №8. Звертають на себе увагу результати досліджень з роботи [13]. У ній показано, що заряд з КО з кутом, який змінюється за рахунок криволінійної поверхні твірної, пробиває в бетоні отвори на $(30\ \ldots40)\%$ глибші, ніж заряд з конічним КО, кут при вершині якого $(50\ldots60)^\circ$. При цьому кут при вершині наближається до критичної величини $\leq 30^\circ$, коли струмінь на цій ділянці може і не утворюватись, а біля основи КО сягає $\geq 60^\circ$. Аналогічний результат маємо при порівнянні глибин пробиття КС при сплескуванні конічних (№3, №5) і еліптичного (№4) КО того ж калібру, що №3. При цьому швидкість детонації в серії зарядів №4 з еліптичним КО була приблизно на 300 м/с нижчою, ніж в зарядах №3 і №5. Зі зменшенням кута при вершині КО глибина пробиття зростає внаслідок збільшення швидкості КС (див. Рис. 3 і Табл. 1).

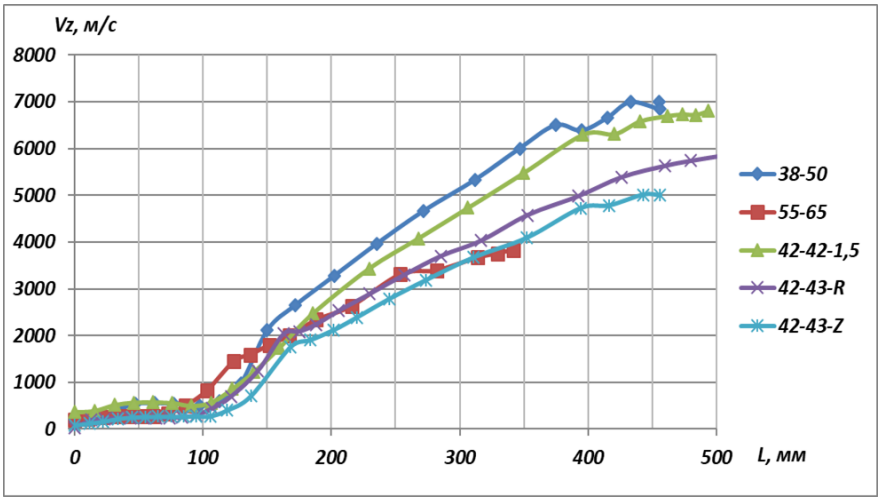

Рис. 3. Розподіл швидкості матеріалу КС по маркерах для кумулятивних облицювань: 55-65 Z ($t = 98$ мкс), 42-43 Z ($t = 91$ мкс), 42-43 R ($t = 91$ мкс), 42-42 R ($t = 80$ мкс), 38-50 R ($t = 72$ мкс)

Табл. 1. Ефективність зарядів з КО різної форми

№ п/п	d_c, мм	2α, град.	m_{exp}, г	F, мм	Матеріал КО	l/d_c	d_1/d_c
1	26.2	70	10	35	Cu / W-Cu-Pb	2.03	0.34
2	26.0	55/60	10	20/35	Cu / W-Cu-Pb	3.3/4.4	0.29/0.27
3	30.0	44/48	(17 ... 18)	13.1	Cu (18 ... 19) г / W-Cu-Pb	3.0/4.7	0.4/0.29
4	30.0	еліпс (15 ... 50)°	24	40	Cu (21 ... 23) г	3.33	0.27
5	36.6	43/45	(27 ... 29)	50	Cu	(2.5 ... 2.8)	0.43
6	35.5	43/47	25	35	Cu / W-Cu-Pb	(5.0 ... 5.3)/6.2	0.33/0.26
7	35.5	43/47	25	35	W-Pb	(6.5 ... 7)	0.25
8[1]	100	—	—	(750 ... 1000)	Cu / W-Cu (25 ... 75)%. мас.	8/(11 ... 12)	—
9[2]	100	42	—	620; 660	Ta	6.2; 6.6	(0.57 ... 0.6)
10[3]	34.7	змінний	27	≈ 60	Cu (18 ... 19) г	12.2	0.43
11[4]	76	27; 35; 60	—	60	Сталь	1.7; 2.1; 2.7	—

[1]мішень – загартована сталь, твердість 239 HB [6],

[2]мішень – броньова сталь RXA, титановий сплав [12],

[3]мішень – сталь Ст. 3 (пластина, 10мм) – бетон [13],

[4]мішень – броньова сталь [14].

2.2. Вплив схеми збудження детонації. Результати чисельного моделювання

На Рис. 3 показано розподіл швидкостей елементів кумулятивних струменів, утворених при сплескуванні КО з монолітної міді, які мають різну форму: 55°/60° (конус прогресивної товщини); 42° (конус сталої товщини); 42°/43° (конус прогресивної товщини); 38°/50° (біконічне КО з кутом при вершині 38° і кутом при основі конуса 50°). Позначення Z означає збудження детонації із точки на осі симетрії, R – збудження детонації по кільцевому контуру завдяки лінзовому вузлу. Ці криві наочно показують, наскільки відрізняються швидкісні характеристики КС при сплескуванні лайнерів різної форми й товщини.

Криву для заряду з лайнером (55 . . . 65)° додано для того, щоб забезпечити порівняння з експериментом [15]. Її форма й положення відносно інших показує, що ефективна довжина КС для сталевої мішені з $V_c = 2000$ м/с (критична швидкість, при якій проникання припиняється) складає приблизно 180 мм. В експерименті досліджувалась зменшена модель заряду калібром 25.7 мм. Лайнер виготовлявся із порошкової міді. Пористість і густина міді при вершині були відповідно близько 10% і 8 г/см^3. Середня швидкість передньої частини КС становила 4367 м/с. Енергетичні характеристики вибухового матеріалу в експерименті й розрахунках вибирались приблизно однаковими – ГФ, швидкість детонації (8000 . . . 8100) м/с.

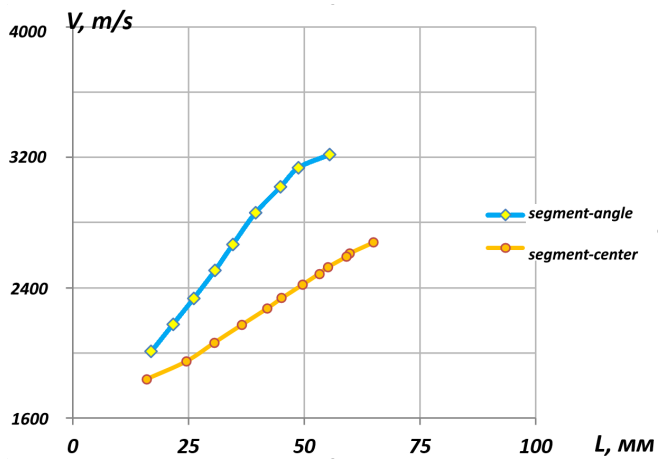

Рис. 4. Розподіл швидкості матеріалу ПВЕ по маркерах для низькосферичного сегмента

При зменшенні кута при вершині конуса збільшується швидкість КС і його довжина, що забезпечує більшу глибину проникання. На Рис. 4 наведено аналогічні криві для ПВЕ, які утворюються при сплескуванні низькосферичного сегмента для двох схем збудження детонації – Z і R.

2.3. Вплив матеріалу КО на швидкість руху КС у вільному польоті та глибину пробиття

У роботі [16] сформульовано грубе правило наближеного визначення потенційної швидкості суцільних, нерозірваних КС: максимально можлива швидкість вершини струменя V_z у 2.34 рази перевищує об'ємну швидкість звуку матеріалу лайнера. Виходячи з цього, проведено ранжування металів за критерієм $V_z\sqrt{\rho_j}$, де ρ_j – густина матеріалу КС. Тут перші місця займають відповідно `W`, `Mo`, `Ni`, `Cu`. Ці результати пояснюють, наприклад, більш високі швидкісні характеристики молібденових та вольфрамових КС – $V_z = (11250 \ldots 11650)$ м/с і $V_z = (8490 \ldots 9330)$ м/с відповідно. Вони перевищують показники для аналогічних легших мідних КС – $V_z = (8400 \ldots 8500)$ м/с [17].

Успіхи сучасного матеріалознавства дозволяють створювати масивні мікроламінати `Mo-Cu` товщиною до (1.5 . . . 2) мм, в яких шари молібдену й міді можуть складати від

1 до 7 мкм [18]. При певних значеннях товщин шарів спостерігається збільшення пластичності такого композитного матеріалу, що позитивно впливає на глибину пробиття. Крім того, представляє практичний інтерес комбінований лайнер, у якого вершину виконано з молібдену, а все інше – з міді. Така конструкція дозволяє розігнати передню частину КС до максимальних швидкостей. Зауважимо, що технології порошкової металургії дозволяють створювати матеріали досить низької пористості й достатньо високої міцності, а також градієнтні матеріали [9, 11, 19]. Досі в Україні дослідження проводилися переважно з композитами `W-Cu`, `W-Pb`, `W-Cu-Pb`, `W-Cu-Pb-Al`. Зовсім не приділялась увага таким перспективним металам як молібден і тантал у двох варіантах виготовлення: монолітний і порошковий низької пористості.

2.4. Вплив пористості матеріалу КО

В експериментах з пористими й монолітними кумулятивними облицюваннями було помічено, що глибина пробиття та об'єм каналу, який утворюється при прониканні КС, збільшуються при переході від монолітного до пористого матеріалу [19]. Це було зафіксовано в окремих експериментах на мішені зі сталі Ст. для К3 з монолітними й пористими алюмінієвими облицюваннями – глибина пробиття 32 мм і (35 ... 40) мм відповідно, а також із мідними – глибина пробиття 74 мм і (85 ... 90) мм. Тут калібр заряду з алюмінієвими облицюваннями був 25 мм, а з мідними – 30 мм. Відстань до першої перепони становила відповідно 9.1 мм і 13 мм.

У роботі [20] показано, що при ударі зі швидкістю 4000 м/с по мішені монолітним стержнем і стержнем з пористого матеріалу, який має ту ж масу, глибина проникання останнього буде в $\sqrt{2-\alpha}$ більша. Тут $\alpha = \rho_{00}/\rho_0$ відносна пористість; ρ_{00} – густина пористого матеріалу, ρ_0 – густина монолітного матеріалу. В цьому випадку матеріал стержня – безградієнтний, а всі його елементи стержня рухаються з однаковими швидкостями. У випадку КС лише частина матеріалу рухається зі швидкостями ≥ 4 км/с (Рис. 3). Переважно саме високошвидкісні компоненти забезпечують пробиття мішені. Дійсно, експерименти підтверджують збільшення глибини пробиття при високошвидкісному ударі пористими КС, що узгоджується з теорією для стержнів. Слід зазначити, що цей висновок справедливий для швидкостей удару, коли можна знехтувати впливом міцності матеріалу мішені. При цьому для стержнів відносно непогане наближення результату в порівнянні із чисельним розрахунком дає гідродинамічна теорія проникання в припущенні нестисливості матеріалів [20]. Зауважимо, що всі отвори, які утворюються КС із пористих матеріалів, чисті. При неповному пробитті мішені КС з монолітної міді отвір, як правило, повністю або частково заповнюється матеріалом КС.

2.5. Вплив міцності та твердості матеріалу мішені

У роботі [12] показано, що у разі комбінованих шаруватих мішеней, виготовлених з броньової сталі RXA й титанового сплаву Ti-6Al-4V, глибина пробиття зменшується у порівнянні мішенню зі сталі RXA, якщо товщина титанового сплаву у складі броні не менша, ніж (200 ... 300) мм. Слід зазначити, що міцність титанового сплаву приблизно така ж як і сталі RXA, а твердість приблизно на 16% вища при густині меншій на 40%. Калібр заряду в експериментах був 100 мм, за вибухову речовину правив октол 75/25. Швидкість голови КС складала 8.2 км/с, а хвостової частини – 2.14 км/с. Середній

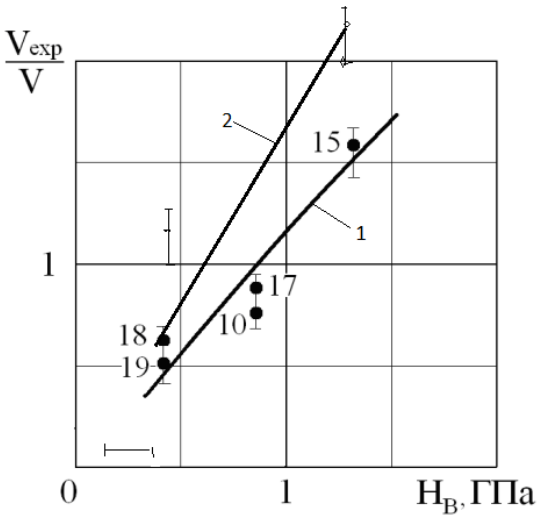

Рис. 5. Залежність відношення об'єму ВР до об'єму кратера V_{exp}/V від твердості перешкоди за Брінеллем для пористих КС із різних матеріалів: *10 і 17* — сталь Ст. 3, цинк і АМЦ-Н; *18 і 19* — цинк і АМЦ-Н; *15* — сталь Ст. 3; *алюміній* — крива 1; *мідь* — крива 2

радіус КС становив 1.85 мм.

Аналогічний вплив твердості мішені на глибину пробиття та об'єм кратера відзначено в статті [19]. На Рис. 5 наведено дані для КС з алюмінію, доповнені даними для мідного КС. У публікації [21] показано, що залежність глибини пробиття броньованої сталі від її міцності для КС із монолітної безкисневої міді OFHC близька до лінійної. Калібр заряду по основі конічного лайнера товщиною 1.2 мм був 31.8 мм, а кут при вершині конуса – $2\alpha = 50°$. Металографічний аналіз структури матеріалу виготовлених лайнерів показав середній розмір зерна (15 ... 25) мкм і твердості (55 ... 65) HV. Вибухові речовини в заряді – RDX + 5% Viton A200, HMX + 5% Viton A200. Густини й швидкості детонації для них становлять 1.76 г/см^3 і 8424 м/с, 1.84 г/см^3 і 8730 м/с відповідно. Флегматизатор Viton A200 являє собою еластомер з вмістом фтору 66% і густиною 1.82 г/см^3. Виготовлений з полівінілхлориду (ПВХ) корпус заряду має внутрішній діаметр 32 мм і товщину стінки 2 мм. Заряд установлювали на відстані 26 мм від мішені. Зростання динамічної межі плинності з 0.47 ГПа до 1.84 ГПа призводило до зменшення глибини пробиття броньованої сталі – приблизно від 12 см до 3.9 см. У роботі [22] показано, що проникання мідного КС у сталеву й композитну мішені зі скла та алюмінію приблизно однакове як у часі, так за максимальним значенням, що свідчить про незначний вплив міцнісних характеристик матеріалу мішені.

2.6. Вплив швидкості детонації на параметри КС і пробиття

У попередній роботі [23] ми відзначали вплив енергетичних характеристик на швидкість КС у вільному польоті та результати пробиття. Було показано, що є певна кореляційна залежність між швидкістю детонації та швидкістю КС для конічних КО. Загальновідома закономірність зростання швидкості КС V_0 зі збільшенням швидкості детонації D у першому наближенні близька до лінійної. В якомусь сенсі це підтверджу-

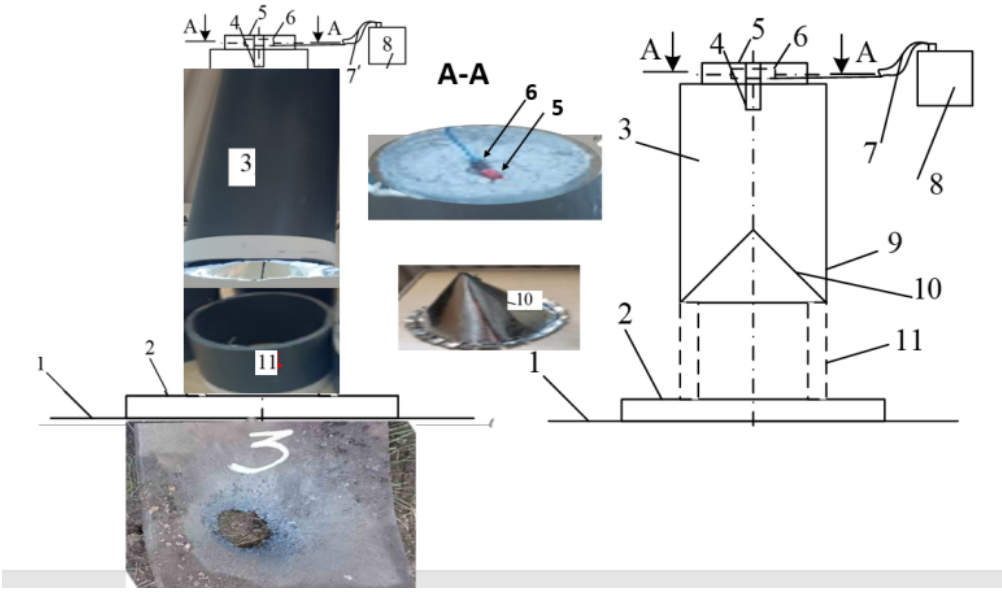

Рис. 6. Заряд СВР з кумулятивною виїмкою та воронкою зі сталі на сталевій пластині (ініціювання за допомогою електродетонатора та нитки детонаційного шнура):
1 — поверхня ґрунтового масиву; *2* — сталева пластина; *3* — заряд СВР;
4 — стрічка ПЕ з липучим шаром; *5* — нитка детонаційного шнура; *6* — електродетонатор ЕД 8-Ж;
7 — підривна магістраль; *8* — підривна машинка; *9* — пластмасова труба (діаметр 100 мм, висота 300 мм, товщина стінки 6 мм); *10* — кумулятивна воронка (товщина 0.5 мм);
11 — підставка для виставлення необхідної відстані

ють дані роботи [24] для напівсферичного алюмінієвого лайнера: при $D = 2100$ м/с, $V_0 = 3660$ м/с. Для малощільних спінених вибухових матеріалів (СВР) зі швидкістю детонації (1400 . . . 2500) м/с можна спрогнозувати, що швидкість мідного, або сталевого КС не перевищуватиме (2500 . . . 4000) м/с залежно від кута у вершині конічного лайнера. На Рис. 6 показано результати вибуху кумулятивного заряду СВР на мішені «сталева пластина – ґрунт» (товщина пластини 10 мм). Калібр заряду становив 90 мм, склад СВР – подрібнена аміачна селітра, ПАР, дрібнодисперсний алюміній. Конічне облицювання було виготовлено зі сталевої жерсті товщиною 0.5 мм. Кут при вершині був 60°. Діаметр пробитого отвору становив приблизно 50 мм. Якщо порівняти цей результат з результатом дії маломасштабної моделі КЗ з кутом при вершині 55°/60° калібром 25.7 мм, який утворює в сталевій пластині отвір діаметром (9 . . . 10) мм, то маємо відношення калібрів 3.6. Тоді, враховуючи пластичну деформацію пластини при ударі КС від заряду великого калібру, можна вважати відношення діаметрів вхідних отворів рівним приблизно чотирьом. Оскільки діаметр отвору визначається діаметром і швидкістю КС, то для забезпечення геометричної подібності з коефіцієнтом від 3.6 до 4 необхідно, щоб діаметри КС співвідносились, як 4:1, а швидкості були достатньо близькі. Очевидно, такі оцінки мають наближений характер через різні матеріали корпусів і КО зарядів, товщини облицювань тощо. Незважаючи на це, вони дозволяють спрогнозувати величину швидкості КС, що й необхідно в практичних застосуваннях.

3. ВИСНОВКИ

Розглянуто фізичні й матеріалознавчі чинники, які впливають на ефективність кумулятивних зарядів. Для утворення ефективних ударних ядер і подовжених високошвидкісних елементів головне значення мають динамічна міцність і пластичність матеріалу облицювання.

Ефективність конструкцій кумулятивних зарядів глибокого пробиття забезпечується формою та матеріалом облицювання, а також лінзовою схемою збудження детонації вибухової речовини. Для зарядів у цивільних галузях промисловості можна застосовувати порошкові матеріали й технології їх виготовлення. Для виробів військового призначення необхідно використовувати монолітні метали та сплави або ж запроваджувати спеціальні технології, здатні забезпечити формування низькопористих облицювань кумулятивних виїмок достатньої міцності.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в межах цільової програми досліджень НАН України.

REFERENCES

[1] W. Li, X. Wang, and W. Li, "The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 414–424, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.08.008

[2] P. V. Kruglov and V. I. Kolpakov, "Mechanism of explosive formation of high-velocity elongated projectiles from steel segment lining," *Engineering Journal: Science and Innovation*, no. 12, 2017. DOI: https://doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714

[3] W. Walters, *Introduction to shaped charges*. Aberdeen Proving Ground, MD: Army Research Laboratory, 2007.

[4] M. Salkičević, "Numerical simulations of the formation behavior of explosively formed projectiles," *Defense and Security Studies*, vol. 3, pp. 1–14, 2022. DOI: https://doi.org/10.37868/dss.v3.id183

[5] A. B. Tymoshenko and I. B. Chepkov, "Simulation of combat units, containing shell-forming elements," *Military Technical Collection*, no. 5, pp. 71–78, 2011. DOI: https://doi.org/10.33577/2312-4458.5.2011.71-78

[6] C. Voumard, H. Roduner, W. R. Santschi, and H. Wisler, "Performances and behaviour of WCu-pseudo-alloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve," in *Proceedings of 19th International Symposium on Ballistics. Vol. 1*. Interlaken, Switzerland: DEStech Publications, 2001.

[7] Q. Z. Xu, J. P. Yin, Z. J. Wang, J. Y. Yi, and F. D. Dong, "Effect of a liner material on the formation of the wrapping explosively-formed penetrator," *Strength of Materials*, vol. 50, no. 1, pp. 54–62, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11223-018-9942-4

[8] Y. M. Sidorenko, "Methodology for two-dimensional computer modeling of the functioning processes of high-explosive fragmentation ammunition," *Artilleriiskoe i Strelkovoe Vooruzhenie*, no. 1, pp. 18–21, 2005.

[9] Y. Voitenko, R. Zakusylo, and S. Zaychenko, "Influence of the striker material on the results of high-speed impact at a barrier," *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 18, no. 3, pp. 405–423, 2021. DOI: https://doi.org/10.22211/cejem/142615

[10] G. Hussain, A. Hameed, J. G. Hetherington, A. Q. Malik, and K. Sanaullah, "Analytical performance study of explosively formed projectiles," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 54, no. 1, pp. 10–20, 2013. DOI: https://doi.org/10.1134/s0021894413010021

[11] J. Borkowski, Z. Wilk, P. Koslik, L. Szymanczyk, and B. Zygmunt, "Application of sintered liners for explosively formed projectile charges," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 118, pp. 91–97, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2018.04.009

[12] W. Walters, W. Gooch, and M. Burkins, "The penetration resistance of a titanium alloy against jets from tantalum shaped charge liners," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 26, no. 1–10, pp. 823–830, 2001. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/s0734-743x(01)00135-x

[13] Ł. Habera, K. Hebda, P. Koslik, and T. Sałaciński, "The shooting tests of target perforating ability, performed on cast concrete cylinders," *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 17, no. 4, pp. 584–599, 2020. DOI: https://doi.org/10.22211/cejem/132066

[14] F. A. Baum, L. P. Orlenko, K. P. Stanyukovich, and B. I. Shekhter, *Physics of explosion*, K. P. Stanyukovich, Ed. Moscow: Fizmatlit, 1975.

[15] Y. I. Voitenko, S. V. Goshovskii, O. O. Kostiuk, and A. M. Pasichnyk, "On optimum designs and materials of shaped charges for practical applications," *Technical Engineering*, no. 1(91), pp. 287–297, 2023. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-287-297

[16] M. Held, "Liners for shaped charges," *Journal of Battlefield Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 1–6, 2001.

[17] J. D. Pham, E. L. Baker, and S. De Fisher, "Shaped charge jet flash radiograph digitization," Picatinny, NJ, Tech. Rep., 2005.

[18] International Center for Electron Beam Technologies of E. O. Paton Electric Welding Institute, NAS of Ukraine. [Online]. Available: https://www.paton-icebt.kiev.ua/?n=mater

[19] Y. I. Voitenko and V. P. Buhaiets, "Effect of aluminum on impact properties of composite cumulative jets," *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraïni*

"Kiïvs'kij politehničnij institut". Seriâ "Girnictvo", no. 30, pp. 36–48, 2016. DOI: https://doi.org/10.20535/2079-5688.2016.30.67626

[20] S. V. Fedorov, "On determination of the penetration depth of porous impactors during hypervelocity interaction," *Technical Physics*, vol. 77, no. 10, pp. 131–134, 2007.

[21] T. Elshenawy, A. Elbeih, and Q. M. Li, "Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 136, pp. 234–242, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.041

[22] B. Moran, L. A. Glenn, and A. Kusubov, "Experiments and calculations of jet penetration in glass," in *Proceedings of the Combat Vehicle Survivability Symposium*, Gaithersburg, MD, 1991, pp. 1–12.

[23] Y. I. Voitenko, V. V. Boiko, O. O. Kostyuk, Y. M. Sidorenko, and S. V. Goshovskyi, "Modern shaped charges and ways of increasing their efficiency," *Hydrodynamics and Acoustics*, vol. 2(92), no. 3, pp. 256–272, 2022.

[24] O. M. Terentiev, P. A. Gontar, and A. Shukurov, "Energetic parameters of recoil during explosion-mechanical drilling," *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, no. 5, pp. 17–23, 2016. DOI: https://doi.org/10.20535/1810-0546.2016.5.71981

ЛІТЕРАТУРА

[1] Li W., Wang X., Li W. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator // International Journal of Impact Engineering. — 2010. — Vol. 37, no. 4. — P. 414–424.

[2] Круглов П. В., Колпаков В. И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2017. — № 12(72).

[3] Walters W. Introduction to shaped charges. — Aberdeen Proving Ground, MD : Army Research Laboratory, 2007. — 110 p.

[4] Salkičević M. Numerical simulations of the formation behavior of explosively formed projectiles // Defense and Security Studies. — 2022. — Vol. 3. — P. 1–14.

[5] Тимошенко А. Б., Чепков І. Б. Моделювання функціонування бойових частин, що містять снарядоформуючі елементи // Військово-технічний збірник. — 2011. — № 5. — С. 71–78.

[6] Performances and behaviour of WCu-pseudo-alloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve / Voumard C., Roduner H., Santschi W. R., and Wisler H. // Proceedings of 19th International Symposium on Ballistics. Vol. 1. — Interlaken, Switzerland : DEStech Publications. — 2001.

[7] Effect of a liner material on the formation of the wrapping explosively-formed penetrator / Xu Q. Z., Yin J. P., Wang Z. J., Yi J. Y., and Dong F. D. // Strength of Materials. — 2018. — Vol. 50, no. 1. — P. 54–62.

[8] Сидоренко Ю. М. Методика двумерного компьютерного моделирования процессов функционирования осколочно-фугасных боеприпасов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. — 2005. — № 1. — С. 18–21.

[9] Voitenko Y., Zakusylo R., Zaychenko S. Influence of the striker material on the results of high-speed impact at a barrier // Central European Journal of Energetic Materials. — 2021. — Т. 18, № 3. — С. 405–423.

[10] Analytical performance study of explosively formed projectiles / Hussain G., Hameed A., Hetherington J. G., Malik A. Q., and Sanaullah K. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 2013. — Vol. 54, no. 1. — P. 10–20.

[11] Application of sintered liners for explosively formed projectile charges / Borkowski J., Wilk Z., Koslik P., Szymanczyk L., and Zygmunt B. // International Journal of Impact Engineering. — 2018. — Vol. 118. — P. 91–97.

[12] Walters W., Gooch W., Burkins M. The penetration resistance of a titanium alloy against jets from tantalum shaped charge liners // International Journal of Impact Engineering. — 2001. — Vol. 26, no. 1–10. — P. 823–830.

[13] The shooting tests of target perforating ability, performed on cast concrete cylinders / Habera Ł., Hebda K., Koslik P., and Sałaciński T. // Central European Journal of Energetic Materials. — 2020. — Vol. 17, no. 4. — P. 584–599.

[14] Физика взрыва / Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и Шехтер Б. И. ; под ред. Станюковича К. П. — Москва : Физматлит, 1975. — 704 с.

[15] Про оптимальні конструкції і матеріали кумулятивних зарядів для деяких практичних застосувань / Войтенко Ю. І., Гошовський С. В., Костюк О. О. і Пасічник А. М. // Технічна інженерія. — 2023. — № 1(91). — С. 287–297.

[16] Held M. Liners for shaped charges // Journal of Battlefield Technology. — 2001. — Vol. 4, no. 3. — P. 1–6.

[17] Shaped charge jet flash radiograph digitization : Rep. / US Army Armament Research, Development and Engineering Center ; executor: Pham J. D., Baker E. L., De Fisher S. — Picatinny, NJ : 2005. — 39 p.

[18] International Center for Electron Beam Technologies of E. O. Paton Electric Welding Institute, NAS of Ukraine. — [Онлайн]. Режим доступу: https://www.paton-icebt.kiev.ua/?n=mater.

[19] Войтенко Ю. И., Бугаец В. П. Влияние алюминия на ударные свойства композитных кумулятивных струй // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». — 2016. — № 30. — С. 36–48.

[20] Федоров С. В. К определению глубины проникания пористых ударников при гиперскоростном взаимодействии // Журнал технической физики. — 2007. — Т. 77, № 10. — С. 131–134.

[21] Elshenawy T., Elbeih A., Li Q. M. Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets // International Journal of Mechanical Sciences. — 2018. — Vol. 136. — P. 234–242.

[22] Moran B., Glenn L. A., Kusubov A. Experiments and calculations of jet penetration in glass // Proceedings of the Combat Vehicle Survivability Symposium. — Gaithersburg, MD. — 1991. — P. 1–12.

[23] Сучасні кумулятивні заряди і шляхи підвищення їх ефективності / Войтенко Ю. І., Бойко В. В., Костюк О. О., Сидоренко Ю. М. і Гошовський С. В. // Гідродинаміка і акустика. — 2022. — Т. 2(92), № 3. — С. 256–272.

[24] Гонтар П. А., Терентьєв О. М., Шукуров А. Енергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра під час вибухо-механічного буріння // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2016. — № 5. — С. 17–23.

Yu. I. Voitenko, Yu. M. Sidorenko, V. V. Boiko,
A. L. Han, A. M. Pasichnyk, V. P. Buhaiets

Physical and material science bases of increasing the efficiency of armor penetration by cumulative charges

The paper analyzes the results of modeling the functioning of cumulative charges intended for the explosive forming of projectiles and elongated high-speed elements. Given the possibility of their destruction in free flight due to significant velocity gradients along the element, the careful selection of materials and possible preliminary tests are necessary when choosing lining materials and designing charges. The simulation results relate to two detonation excitation schemes: from a point on the axis of symmetry and along an annular contour in the presence of an inert lens. The results of modeling the functioning of cumulative charges intended for forming the cumulative jets with various shapes of liners and detonation excitation schemes are presented. The numerical data are compared with that from experimental studies obtained on the model charges. The results of experiments on the penetration of metal and combined (metal-concrete, metal-soil) targets by charges of various designs are summarized. The impact of the density, speed of sound, and porosity of the lining materials, as well as the strength and hardness of the target materials, on the penetration depth is considered. Some described experiments deal with self-made explosive materials having low detonation speeds, with the effect of cumulation of explosion energy. In particular, we propose ways to increase the efficiency of cumulative charges by using new materials, micro-laminates of various metals, materials with gradient properties, etc. The obtained conclusions can be used in humanitarian demining and disposal of ammunition. Another application for the results of the optimization of the lining form and materials of cumulative notches is the designing of deep penetration charges for the oil and gas extraction industry.

KEY WORDS: shaped charge, detonation, liner, cumulative jet, explosively formed projectile