
УДК 622.235:553.98+67.017

НОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ В МАШИНОБУДУВАННІ

Войтенко Ю.І.

Український державний геологорозвідувальний інститут, КПІ ім. Ігоря Сікорського,
м. Київ, Україна

***Анотація:** Запропоновано клас нових композитних матеріалів, які дозволяють підвищити ефективність вибухових технологій і роботи кумулятивних пристроїв в задачах спеціального машинобудування та інших галузей промисловості. Експериментально показано, що основні умови функціонування таких матеріалів – оптимальна пористість матеріалу лайнера і хімічна взаємодія компонентів матеріалу в процесі проникнення в мішень. Підвищення ефективності кумулятивних струменів і компактних ударників із таких матеріалів досягається за рахунок виділення додаткової енергії в процесі деформації пористого матеріалу ударника і теплоти хімічних реакцій компонентів матеріалу лайнера: міді, нікелю і алюмінію з утворенням алюмінідів металів. Запропоновано ряд перспективних композиційних матеріалів з використанням інших важких металів та енергетичних добавок.*

***Ключові слова:** функціональні матеріали, кумулятивний заряд, лайнер, пористість*

В останні декілька десятиріч поряд з розумними пристроями, розумними технологіями в сучасному науково-технічному прогресі помітне місце займають функціональні матеріали, в англійській літературі – smart materials.

Функціональними називають такі матеріали, які контролювано змінюють свої властивості у відповідь на зміни навколишнього середовища. Їхньою основною властивістю є здатність перетворювати один вид енергії в інший. [1].

Мета даної роботи – аналіз досягнень в області розробки нових функціональних матеріалів для виготовлення облицювань кумулятивних зарядів і визначення перспективних напрямів досліджень.

В сучасних конструкціях зарядів для виготовлення облицювань, в англійській літературі і далі за текстом – лайнерів, використовують порошки важких металів, а також лайнери із суцільних заготовок. Переважно – мідь, нікель, молібден, вольфрам, тантал та їх композити. Відомо, що одним із основних параметрів роботи кумулятивного заряду є глибина пробиття мішені. Вона визначається конструкцією заряду, швидкістю детонації вибухової речовини, матеріалом лайнера та точністю виготовлення деталей заряду, зокрема лайнера. Ряд конструкцій кумулятивних зарядів утворюють не струмені, а ударні ядра (УЯ), які рухаються в декілька разів повільніше, ніж КС і мають масу, яка дорівнює масі лайнера. Ефект впливу матеріалу пористих і суцільних лайнерів на характер дії кумулятивного заряду на мішень був установлений в експериментах з порошками металів Cu, W, Pb, Ni, Al та суцільними

лайнерами із Al і Cu в умовах ударно - хвильових навантажень і дії кумулятивних струминних течій на крихкі і пластичні матеріали [2-5].

Очевидно, що основною мірою енергії ударної взаємодії КС чи УЯ з перепною є об'єм каналу. Вже після заміни лайнера з кутом у вершині кумулятивного заряду $55^\circ/60^\circ$ із суцільного Al на аналогічний пористий ми отримали збільшення об'єму кратера в 1,8-1,9 рази в результаті вибуху заряду калібром 26 мм. Маса вибухового матеріалу (RDX) - 10 г [3]. Приблизно такий же ефект отримано для суцільного і пористого лайнерів із міді при підриванні зарядів калібром 31 мм; маса вибухівки 15 г. Пористість лайнера із Al складала 8-16 %, із Cu – 11 – 28 %. Тобто фактично введення пористості в суцільний металічний лайнер заряду та її параметри є одним із шляхів створення функціональних матеріалів. Для отримання одного і того ж питомого об'єму тиск і внутрішня енергія пористої речовини повинні бути суттєво більшими, ніж суцільної. Тому при однакових розмірах пористих і суцільних КС і УЯ тиск на матеріал мішені, температура і енергія ударної взаємодії буде більша у першому випадку. Іншим додатковим шляхом збільшення енергії ударної взаємодії є введення в склад композитного матеріалу лайнера компонентів, які реагують між собою, перетворюючи енергію механічного ударно-хвильового навантаження в енергію теплоти хімічних перетворень [3].

В експериментах було встановлено, що застосування пористих композитів Cu-Al, Cu-Pb-Al, Ni-Al, W-Cu-Pb-Al дозволяє отримувати канали об'ємом більшим, ніж базові (Cu, Cu-Pb, Ni-Pb, W-Cu-Pb) (без Al) на 20 – 90%. Це свідчить про перетворення частини механічної енергії ударної взаємодії в хімічну та теплову в реакціях взаємодії Al з іншими компонентами композитів [3, 4]. Величину цієї енергії для композита Cu-Al можна оцінити значенням $\approx 15...20\%$ від енергії КС для стехіометричного співвідношення Cu і Al. Необхідно зазначити, що застосування Al, B, Mg та їх сполук в складі вибухових і горючих матеріалів досить відоме [6]. Дослідженню ж взаємодії цих речовин та їх сполук з іншими металами та неметалами в умовах ударно-хвильового навантаження присвячено значно менша кількість робіт. Взаємодія Al з Cu, Ni, Nb, Co, Pd в режимі теплового вибуху досліджувалась в багатьох роботах, причому найбільш повно в [7]. Режими нагрівання та швидкості горіння металів в екзотермічних реакціях взаємодії можна охарактеризувати як квазістатичні. В той же час в ряді робіт досліджувалась поведінка, в тому числі теплові ефекти хімічних реакцій за фронтом ударної хвилі при ударно-хвильових навантаженнях [8 - 10]. В них та інших роботах було показано, що при певних критичних параметрах за фронтом ударної хвилі (ФУХ) починається хімічна взаємодія компонентів в суміші з утворенням нових речовин і виділенням додаткової енергії.

Так, згідно [8] взаємодія компонентів піротехнічної суміші CuO-Al починається при тиску на ФУХ ~ 10 ГПа. Температура при цьому підвищується до $\sim 3000^\circ\text{C}$ з виділенням додаткової енергії ≈ 4 кДж/г. Аналогічний ефект спостерігається в суміші S+Al (0,45+0,55 мас.) при ударі по зразку сталевим ударником діаметром 40 мм і висотою 15 мм, швидкістю 2000 м/с і вище [10]. В роботі [11] досліджувалась взаємодія Al і Ni в умовах ударно-хвильового навантаження. В цих дослідах було показано, що структура і склад матеріалу, який утворюється (AlNi) не дуже відрізняється від аналогічного продукту, отриманого традиційним способом (високотемпературним синтезом, що само розповсюджується). Аналогічні перетворення відбуваються при ударі кумулятивного струменя (КС) або ударного ядра в області між ФУХ в КС і контактною поверхнею. Температура при ударі КС із Cu-Al досягає не менше 3000°C . Продукти реакцій між компонентами КС – CuAl_2 , Cu_4Al_9 та інші не ідентифіковані сполуки Cu і Al [3, 4]. Виділення додаткового тепла в осередку удару сприяє збільшенню ступеня пластичної деформації і більшому викиду матеріалу з кратера на гідродинамічній стадії проникнення. Таким чином підвищена ефективність кумулятивних зарядів з пористими композитними облицюваннями пояснюється тим, що композити, які містять Al і метали з температурою плавлення $\leq 3000^\circ\text{C}$ взаємодіють в умовах високих тисків і температури з утворенням алюмінідів і виділенням додаткового тепла аналогічно тепловому

вибуху. Аналогічні процеси відбуваються при взаємодії деяких металів, наприклад Al і Cu з полімером, що містить фтор - політетрафлюоретилен (PTFE), що має хімічну формулу $[C_2F_4]_n$ [12]. В роботі [12] проведено порівняння дії кумулятивного заряду з облицюваннями з чистого PTFE і модифікованого PTFE: Cu-PTFE (38,5-61,5%, мас.) на перепону. Калібр заряду - 40 мм, кут в основі конуса - 55° . Діаметр вхідного отвору збільшувався на 18,5%, вихідного отвору в тильній пластині перепони - на 12,6%. Глибина проникнення в сталеву мішень Ст45 - 30,3 мм.

Для порівняння струмін з PTFE діаметром 2,7 мм пробив канал глибиною 22,1 мм. Збільшення діаметра каналу по всій довжині вказує на виділення додаткової енергії при пробитті перепони. Автори [13] звертають увагу на механізм підвищення енергії такої ж природи при пробитті перепон, що містять алюміній, магній, титан, ударниками з PTFE в результаті хімічної екзотермічної реакції металів з PTFE. Не виключено, що КС із пористого Al також частково взаємодіють з матеріалами мішені: залізом, марганцем, міддю та цинком в сплаві АМЦ-н. Про це свідчить стабільне перевищення об'єму каналу, утвореного алюмінієвим струменем із пористого лайнера, над об'ємом каналу в результаті удару мідного струменя в середньому на 8 – 10 % [3]. В окремих експериментах ця різниця складала 20 – 30 %. В принципі будь-які комбінації матеріалів, які реагують в умовах ударно-хвильового навантаження з виділенням додаткової енергії, корисні для збільшення ударної дії КС та компактних ударників за винятком деяких тугоплавких металів. Так, використання композитного матеріалу W-Al в складі лайнера кумулятивного заряду показало, що розміри каналу в мішені «сталь Ст .3» із вмістом Al змінюються, проте об'єм мало залежить від кількості Al [2]. Основна причина – відсутність реакцій $W+Al = W_xAl_y$ в даному діапазоні енергій ударної взаємодії. Оцінка енергії КС в припущенні про лінійний градієнт розподілу швидкостей елементів вздовж нього з урахуванням експериментальних даних про швидкість головної частини КС, діаметр каналу на вході в сталеву мішень та ефективну довжину КС [2] дає наступні значення: $E_{КС}=27,6$ кДж, 28,3 кДж та 29,9 кДж відповідно для мідного, алюмінієвого та композитного КС. Калібр заряду – 26 мм. Ці оцінки показують, що різна енергія КС для різних матеріалів лайнерів не може бути причиною різкої зміни ударних властивостей. Цими причинами є теплота, яку генерує пористість в зоні деформації КС, і теплота хімічних реакцій в умовах ударно-хвильових навантажень.

Особливий інтерес для науки та практики представляє можливість хімічної взаємодії важких металів (Mo, Ta, W, U) з енергетичними добавками за ФУХ. Враховуючи, що в режимі теплового вибуху з Al взаємодіють тугоплавкі метали (Nb), є підстави надіятися на аналогічний ефект між компонентами композитів Mo+Al, Mo+W при ударно-хвильових навантаженнях [14] при певних швидкостях ударної взаємодії, більших ніж критичні. Якщо наявність хімічних перетворень прямо, або опосередковано доведено в експериментах з композитними КС із Cu-Al, Ni-Al, W-Cu-Pb-Al [3], то питання про можливість таких перетворень у разі застосування інших сумішей та металів, або деяких сполук високоенергетичних матеріалів (MgB_2 , AlB_2) залишається відкритим. В той же час перспективність деяких композицій не викликає сумніву, тому що масова теплота горіння Al в кисні складає 7,4 ккал/г, В – 14,1 ккал/г, MgB_2 – 9,18 ккал/г, AlB_2 – 9,1 ккал/г [15].

Одне із практичних застосувань кумулятивних вибухів – це збудження детонації у ВР за допомогою КС, або компактного ударника. Воно інколи використовується у вибуховій, та гірничій справі, але переважно у військовій справі для підривання вибухових матеріалів в автотранспорті, на складах та арсеналах супротивника, а також у разі ураження ракет при перехопленні. Наявність, або відсутність детонації в кожній ВР при ударі КС, або компактного елемента визначається, наприклад, критерієм: $G=dv^2 > G_{cr}$ (d , v – діаметр КС та його швидкість, G_{cr} – критичне значення параметра, при якому ймовірність детонації дорівнює одиниці) (M. Held) [12]. Зрозуміло, що у разі хімічно активних КС, або компактних ударників величина G_{cr} матиме дещо менше значення для кожної ВР, ніж наведені в [12]. Із фізичних міркувань аналогічний ефект матиме місце при ударі композитного КС або композитного

компактного ударника по стінці резервуару з займистою речовиною (нафта, ракетні палива, паливно-мастильні матеріали).

При певних схемах ударно-хвильового навантаження вихідних порошкових сумішей можна отримувати нові конструкційні матеріали в капсулах збереження, наприклад алюмінід нікелю [11].

Висновок

Встановлено клас нових функціональних матеріалів для вибухових пристроїв кумулятивної дії і сформульовано вимоги до них: висока щільність компонентів та їхня оптимальна пористість; максимальний тепловий ефект хімічних реакцій між компонентами в умовах ударно-хвильового навантаження матеріалу струменю або компактного елемента при проникненні. Перспективними енергетичними добавками до відомих металів, які використовуються в пристроях кумулятивної дії (Cu, Ni, Mo, W, Ta) окрім Al можуть бути В, MgB_2 , AlB_2 та їх комбінації.

Список літератури:

1. *Новые интеллектуальные материалы* /Р. Бхавсар, Н.И. Войдя, П. Гангули и др. // Нефтегазовое обозрение. – 2008. – Вып. 4 – С. 38 – 49.
2. *Войтенко Ю.И. Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками* / Ю.И. Войтенко, С.В.Гошовский, А.Г. Драчук, В.П. Бугаец // Физика горения и взрыва. – 2013. – т. 49, № 1. - С. 125 – 131.
3. *Войтенко Ю.И., Бугаец В.П. Влияние алюминия на ударные свойства композитных кумулятивных струй* // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»– 2016. - Вып. 30. - С. 36-48.
4. *Peculiarities of brittle and ductile materials destruction and deformation during the explosion of industrial shaped charges*/ Yu. Voitenko, V. Kravets, A. Shukurov, O. Drachuk //Mining of mineral deposits. -2017. - #2. – p. 12-20.
5. *Тришин Ю.А, Кинеловский С.А. О влиянии пористости на кумулятивное течение* // Физика горения и взрыва. – 2000. – т. 36., №2. – С. 122-132.
6. *Махов М.Н. Влияние добавок алюминия и бора на теплоту взрыва и метательную способность взрывчатых веществ* // Химическая физика. – 2015. – т. 51, №1. – С. 40 – 45
7. *Письменная Е.Б. Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений в режиме динамического теплового взрыва*: дис. кандидата физ.-мат. наук. Черноголовка: Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, 2000. 179 с.
8. *Голубев В.А., Вахрушев В.В., Пантуров Е.В. и др. Поведение пиротехнического состава Al-CuO при ударно-волновом нагружении*. 2001. – 7с. <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/6zst/dokl/sec5/39.pdf>.
9. *Бацанов С.С. Гозуля М.Ф., Бражников М.А. и др. Поведение системы Sn+S в ударных волнах* // Физика горения и взрыва. – 1994. – т.30, №3. – С. 107.
10. *Зелепугин С.А., Никуличев В.Б. Численное моделирование взаимодействия серы и алюминия при ударно-волновом нагружении* // Физика горения и взрыва. – 2000. – т. 36., №6. – С. 186 – 198.
11. *Жуков А.Н., Якушев В.В., Ананьев С.Ю. и др. Исследование алюминид никеля, образовавшегося при ударно-волновом нагружении смесей алюминия с никелем в плоских ампулах сохранения* // Физика горения и взрыва. – 2018. – т.54, № 1- С. 72 – 80
12. *V.H. Chang, J.P. Yin, Z.Q. Cui, T.X. Liu Improved dynamic mechanical properties of modified PTFE jet penetrating charge with shell* // Проблемы прочности. – 2016. - №1. – С.97-105.
13. *Физика взрыва* /под ред. Л.П. Орленко.- Изд. 3-е, испр. – в 2. т. Т.2 – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.
14. *Блошенко В.Н., Бокій В.А., Мержанов А.Г. Механизм самоочистки от примесного кислорода при горении порошков молибдена и бора* // Физика горения и взрыва. – 1988. – т.24, №2 - С. 102 – 111.
15. *Розенбанд В., А. Гани Синтез порошка диборида магния в режиме теплового взрыва* [// Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, №6. – С. 34-39.