

UDK: 623.454.24:621.9.025(047)=861
 COSATI: 19-01, 13.09

Prilog proučavanju izrade i efikasnosti detonacionog sečiva

Dr Mirko Lukić, dipl.inž.¹⁾
 Mr Dragan Vasiljević, dipl.inž.¹⁾

Rad sadrži analizu parametara koji utiču na koncepciju rešenja i tehnološku realizaciju detonacionog sečiva minimalne linearne mase eksploziva. Prikazani su i neki od karakterističnih primera izvedenih opita pri sečenju različitih materijala.

Ključne reči: detonaciono sečivo, eksploziv, olovo, sečenje.

Uvod

POZNATE su različite primene eksploziva u vojne i civilne svrhe, kao npr. sečenje različitih materijala, raznih profila i u različitim uslovima. Ukoliko se eksploziv primenjuje bez obloge (profilisani oblici plastičnog, elastičnog ili nekog drugog eksploziva), količine potrebnog eksploziva su znatne, što zavisi od materijala koji se seče, a "rez" (iako je u ovim slučajevima teško govoriti o "rezu"), dobijen na ovaj način je neravan i izobličen.

Za sečenje metalnih i drugih materijala različitih debljina i profila, primenjena je tehnika kumulativnog punjenja [1,2,3] u realizaciji detonacionog sečiva (cordeau decouplant, kumulativni nož, schneidzündchnur flexible, linear chaped charge).

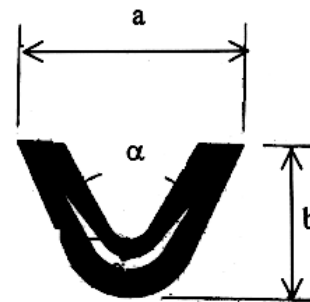
Detonaciono sečivo predstavlja diedarsko eksplozivno punjenje velike dužine čija je obloga od odgovarajućeg metala, a eksploziv heksogen, oktogen ili pentrit. Pošto se radi o usmerenom dejstvu, detonaciono sečivo zahteva izvanrednu homogenost eksplozivnog punjenja i simetriju poprečnog preseka. Zahtevi sečenja su brojni, a najvažniji su: brzina i simultano sečenje, sigurnost funkcionisanja u opasnim radnim uslovima (otvaranje rezervoara sa toksičnim proizvodima) ili u uslovima posebno teškim za rad (podvodni radovi, u vakuumu, vibracije, povišene temperature itd).

U ovom radu je, imajući u vidu dostupne rezultate aktuelnih rešenja u svetu [3] i naša dosadašnja iskustva u tehnološkoj realizaciji i ispitivanju efekata detonacionog sečiva za posebne namene (otvaranje kasetnih bojevih glava) [4], prikazana realizacija detonacionog sečiva minimalne linearne mase eksploziva (ispod 1 g/m) [5] i njegovi efekti pri sečenju različitih materijala.

Teorijski osvrt na formiranje kumulativnog mlaza

U realizaciji detonacionog sečiva kao diedarskog eksplozivnog punjenja, (sl.1), primenjena je tehnika kumulativnog punjenja, pa je razmatranje određenih fundamentalnih zavisnosti koje se odnose na eksploziv,

oblogu, brzinu i efikasnost mlaza, vezano za hidrodinamičku teoriju kumulativnog punjenja [1,2,3].

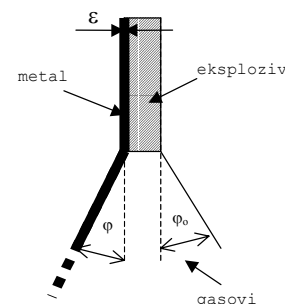


Slika 1. Poprečni presek jedne od varijanti detonacionog sečiva

Osim teorijskog osvrta na formiranje kumulativnog mlaza, navedeni su najvažniji parametri koji su uzeti u obzir i ispitivani u toku realizacije detonacionog sečiva, s minimalnom masom eksploziva po dužnom metru.

Potiskivanje metalne ploče detonacijom eksploziva

Detonacija eksploziva, koji se nalazi u kontaktu s metalnom pločom, prouzrokuje potiskivanje te ploče (sl.2) pod nekim uglom φ koji se naziva ugao potiskivanja.



Slika 2. Šema bočnog potiskivanja metala detonacijom eksploziva

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

Ugao φ_0 , koji stvaraju produkti detonacije, je ugao formiran frontom detonacionog talasa i slobodne površine u pravcu prostiranja detonacionog talasa. Uglovi φ_0 i φ su povezani semiekperimentalnom relacijom do koje je došao Richter [2]:

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{1}{\varphi_0} + \frac{k \rho_p \varepsilon}{e} \quad (1)$$

gde su:

k - koeficijent koji zavisi od karakteristika primenjenog materijala

ρ_p - gustina metalne ploče

ε - debljina metalne ploče

e - debljina eksploziva

Brzina potiskivanja metalne ploče (v) koja je, pretpostavlja se uniformna, može da se prikaže izrazom:

$$v = 2D \sin \varphi / 2 \quad (2)$$

gde su:

D - brzina detonacije primenjenog eksploziva i

φ - ugao potiskivanja metalne ploče

Hidrodinamička teorija kumulativnog punjenja

Hidrodinamička teorija kumulativnog punjenja (charge creuse, hohlandug, chaped charge, hollov charge) zasniva se na dve sledeće hipoteze[1]:

- kumulativni mlaz je fluid i to nekompresibilan,
- detonacioni talas brzine D se prostire normalno na kumulativni levak.

U drugom slučaju, kada je u pitanju efekat potiskivanja, detonacioni talas deluje na metalni kumulativni levak koji se transformiše u mlaz metalnih čestica - kumulativni mlaz (jet, Strahl, jet) koji se prostire vrlo velikom brzinom, a u toku svog kretanja praćen je kumulativnim čepom (noyao, kern, slug) osrednje brzine i daleko veće mase u odnosu na kumulativni mlaz. Formirani kumulativni mlaz prostire se u osi (sl.3) brzinom v_j i ima masu m_j koje mogu da se prikažu izrazima:

$$v_j = v \frac{\cos \alpha / 2}{\sin \beta / 2} \quad (3)$$

$$m_j = m \sin^2 \beta / 2 \quad (4)$$

a brzina v_n i m_n kumulativnog čepa:

$$v_n = v \frac{\cos \alpha / 2}{\sin \beta / 2} \quad (5)$$

$$m_n = m \sin^2 \beta / 2 \quad (6)$$

gde su:

v - brzina potiskivanja metalne ploče

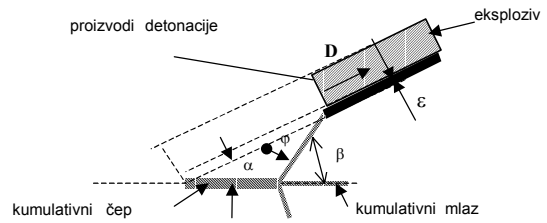
m - masa metala

$$\beta = \alpha + \varphi$$

Navedeni izrazi pokazuju da je glavni deo mase kumulativnog levka u "čepu" i da je brzina kumulativnog mlaza izrazito veća u odnosu na brzinu kumulativnog čepa.

Hipoteza da se fluid kreće subsonično [2], odnosno u ovom slučaju kumulativni mlaz koji se formira kao fluid, limitira vrednost ugla α na neku kritičnu vrednost α_0 , pa je moguće samo:

$$\alpha \geq \alpha_0 \quad (7)$$



Slika 3. Šema funkcionisanja kumulativnog punjenja

odnosno da je:

$$\tan(\alpha_c + \varphi) = \frac{\sin \varphi}{\frac{a}{D} - (1 - \cos \varphi)} \quad (8)$$

gde je a - brzina zvuka u materijalu od koga je napravljen kumulativni levak.

Teorijski, probojnost nekog kumulativnog punjenja zavisi od dužine kumulativnog mlaza, njegove gustine kao i od gustine materijala koji se želi probiti i može se prikazati pomoću izraza:

$$p = L \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_c}} \quad (9)$$

gde je:

p - dubina probojnosti,

L - dužina kumulativnog mlaza (uzima se da je ravna dužini izvodnice levka),

ρ_j - gustina kumulativnog mlaza,

ρ_c - gustina materijala koga probija kumulativni mlaz.

Pošto je probojnost proporcionalna dužini kumulativnog mlaza, dakle dužini izvodnice kumulativnog levka, zavisna je i od ugla α prema izrazu:

$$L = \frac{R}{\sin \alpha} \quad (10)$$

gde je R - prečnik punjenja.

Vidi se da ako ugao α opada, raste dužina kumulativnog mlaza (L), a takođe i brzina kumulativnog mlaza (izraz 3). Međutim, postojanje ugla α_c (7 i 8) limitira dužinu izvodnice (L) koju mlaz može da upotrebi.

Iako nije posebno naglašavan uticaj eksploziva, treba napomenuti da on na probojnost utiče svojim fizičko-hemijskim i mehaničkim karakteristikama i parametrima detonacije.

Ovaj uticaj je obuhvaćen kompletnijim izrazom za izračunavanje dubine probojnosti [1], kojim se maksimalna probojnost nekog kumulativnog punjenja izračunava na sledeći način:

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_c}} v_{oj} - u_{\min} \left(v_{oj} + \frac{\gamma z_o}{t_1} \right) \quad (11)$$

gde su:

ρ_j - gustina mlaza,

ρ_c - gustina prepreke,

v_{oj} - brzina čela mlaza,

u_{\min} - brzina mlaza ispod koje on ne probija prepreku,

z_o - rastojanje dejstva,

t_1 - vreme počev od koga se mlaz fragmentira i

γ - bezdimenzioni eksperimentalni koeficijent.

Izrazom (10) karakteristike eksploziva su obuhvaćene brzinom mlaza. Kada je brzina mlaza veća, veća je i dubina

probojnosti.

Diedarska eksplozivna punjenja

Diedarsko eksplozivno punjenje [2] (charge diedrique, charge coupante, schneidlandug, linear chaped charge) je sastavljeno kao i kumulativno punjenje od eksploziva debljine e , prekrivenog inertnom oblogom konstantne debljine ε .

U slučaju diedarskog punjenja, obloga formira dve ravni s poluuglom α .

Teorijsko izučavanje ovih punjenja ukazuju na to da su ona simultano inicirana po čitavoj dužini [3]. Prethodno navedeni izrazi za kumulativno punjenje važe i u ovom slučaju. Razlike se pojavljuju samo u debljini mlaza i čepa.

Mlaz je oblika tankog noža, tj. male je debljine, tako da je:

$$\varepsilon_j = 2 \varepsilon \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (12)$$

a čep takođe ima oblik noža, ali je mnogo deblji, tako da je:

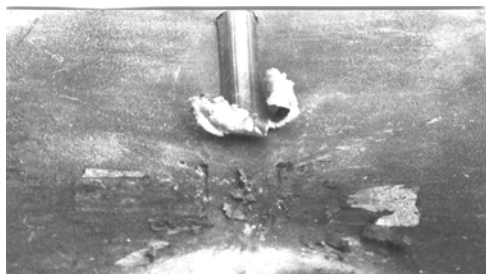
$$\varepsilon_n = 2 \varepsilon \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (13)$$

Parametri koji utiču na koncepciju rešenja detonacionog sečiva

Koncepcija rešenja detonacionog sečiva, posebno kada je u pitanju veoma mala masa eksploziva po dužnom metru, uslovljena je potpunim definisanjem uzajamno vezanih parametara koji se odnose na eksploziv i oblogu detonacionog sečiva, kao i materijal koji se seče [3].

Parametri koji se odnose na eksploziv

Na performanse detonacionog sečiva eksploziv utiče svojom homogenošću, gustinom i brzinom detonacije. Za dati eksploziv koji se isključivo primenjuje u kristalnom stanju, brzina detonacije je funkcija njegove gustine i raste s njegovim povećanjem. Efikasnost sečenja je veća ukoliko je gustina eksploziva veća. Međutim, neophodno je poznavati i u potpunosti definisati ne samo srednju vrednost gustine tog eksplozivnog punjenja, nego i raspored gustine po čitavoj njegovoj dužini. Ponekad se **jedan** eksploziv "male" gustine i nedovoljne homogenosti loše inicira i dolazi do prekida u prostiranju detonacionog talasa (sl.4).



Slika 4. Eksploziv nedovoljne homogenosti

Budući da se traže usmerena dejstva, neophodno je da se poseduje što je moguće veća homogenost eksplozivnog punjenja. Ona zavisi prvenstveno od granulometrijskog sastava upotrebljenog kristalnog eksploziva čiji je uticaj kompleksan.

Ne treba gubiti iz vida ni ostale karakteristike eksploziva, koje mora da budu definisane kada je u pitanju dobro i sigurno funkcionisanje detonacionog sečiva. To su

kritični prečnik koji zavisi od prirode eksploziva, geometrije, otpornost prema temperaturnim promenama, kompatibilnost sa oblogom, stabilnost itd.

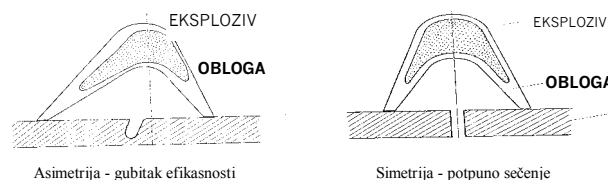
Parametri koji se odnose na oblogu

Za detonaciono sečivo ne mogu se upotrebiti svi materijali kao obloga već samo oni koji svojim karakteristikama mogu da zadovolje zahteve s aspekta tehnologije izrade i efikasnosti formiranja mlaza posle inicijacije.

Na performanse detonacionog sečiva obloga utiče svojom gustinom, mehaničkim karakteristikama i dimenzijama. Dubina reza u materijalu koji se seče zavisi od gustine materijala upotrebljenog kao obloga, pa je u interesu da se primeni metal što veće gustine.

Kada su u pitanju dimenzije, treba napomenuti da za datu izvodnicu diedra (koja teorijski određuje dužinu mlaza [1]), promena ugla prouzrokuje promenu dimenzija poprečnog preseka detonacionog sečiva, a samim tim i promenu brzine mlaza koja se smanjuje s povećanjem ugla.

Posebno treba naglasiti da materijal primenjen za oblogu u toku tehnoloških operacija izrade detonacionog sečiva utiče na simetriju poprečnog preseka koja direktno utiče na njegove performanse. Ako postoje neke neregularnosti u simetriji, formirani mlaz će posle detonacije posedovati



Slika 5. Uticaj simetrije detonacionog sečiva na efikasnost sečenja

neki upadni ugao pa detonaciono sečivo gubi u svojoj efikasnosti (sl.5).

S druge strane, smanjenjem dimenzija poprečnog preseka detonacionog sečiva potiče se njegova veća fleksibilnost (ali i smanjuje efikasnost) koja se može definisati minimalnim prečnikom kružnog savijanja bez ikakve promene na oblozi i eksplozivnom punjenju i bez smanjenja performansi. Na sl.6 su prikazani mogući položaji detonacionog sečiva pripremljenog za ispitivanje.



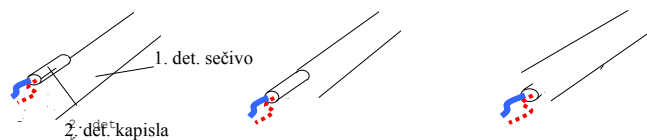
Slika 6. Različiti položaji detonacionog sečiva

Izrada i ispitivanje detonacionog sečiva

U rešavanju tehnološkog postupka izrade detonacionog sečiva zahtevanih karakteristika, osnovno je bilo da se konstruiše uređaj sa sistemom valjaka za izvlačenje olovne cevi napunjene eksplozivom, ali i definiše eksploziv koji će u ovakvoj konfiguraciji obezbediti homogenost, veliku brzinu detonacije, dobru osetljivost na inicijaciju i bezbednost pri radu.

U toku osvajanja i definisanja tehnološkog postupka izrade detonacionog sečiva, moralo se u potpunosti zadovoljiti sledeće:

- da detonaciono sečivo ima homogeno eksplozivno punjenje i simetriju poprečnog preseka;
- da nema prekida u eksplozivnoj niti – punjenju u detonacionom sečivu;
- da se detonaciono sečivo inicira detonatorskom kapislom br.8. (sl.7).



Slika 7. Različiti načini inicijacije detonacionog sečiva

Ispunjenje ovih zahteva rešavano je kroz nekoliko faza:

- priprema kristalnog eksploziva, u ovom slučaju heksogena, s definisanom granulacijom i masenim sadržajem grafitu;
- konstrukcija i izrada uređaja sa specijalno profilisanim valjcima;
- ispitivanja i definisanje tehnološkog postupka izrade detonacionog sečiva.

Tehnološki postupak izrade detonacionog sečiva

Na osnovu postavljenih zahteva za detonaciona sečiva i izvršenih proračuna, definisan je i realizovan uređaj sa sistemom valjaka promenljive brzine obrtaja, koji obezbeđuje izradu detonacionog sečiva željenih karakteristika.

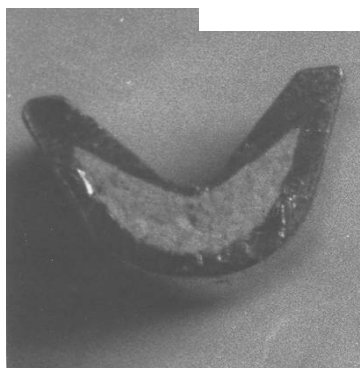
Za detonaciona sečiva upotrebljeni su:

- eksploziv, kristalni heksogen određene granulacije sa dodatkom odgovarajućeg sadržaja grafitu i
- olovne cevi definisanih dimenzija.

Kao metal odabrano je olovo zbog njegove velike gustine i lakoće oblikovanja.

Princip tehnološkog postupka se zasniva na propuštanju olovnih cevi napunjenih grafitiranim heksogenom kroz profilisane valjke. Na taj način se, posle određenog broja operacija, dobija željeni profil detonacionog sečiva definisanih karakteristika (dimenzije, linearna masa eksploziva, homogenost eksplozivnog punjenja itd).

Poseban cilj je bio, da se za specijalne namene realizuje detonaciono sečivo malih dimenzija i veoma male linearne mase eksploziva (ispod 1 g/m). Na sl.8 prikazan je snimak poprečnog preseka ovakvog detonacionog sečiva.



Slika 8. Izgled poprečnog preseka detonacionog sečiva

Ispitivanja detonacionog sečiva

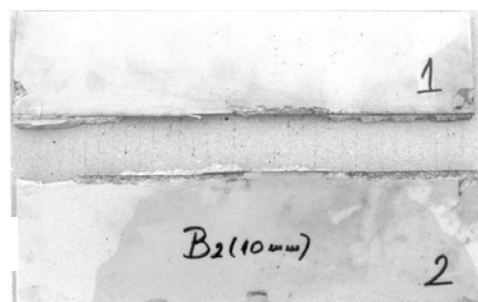
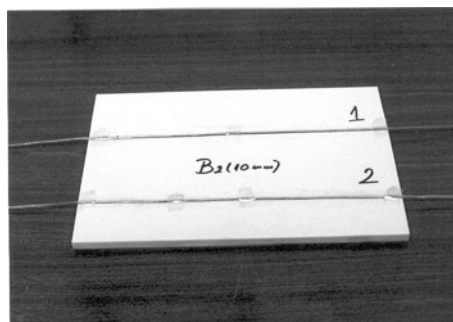
U tabeli 1 prikazane su uporedne karakteristike nekih naših i stranih rešenja detonacionih sečiva [3].

Tabela 1. Karakteristike detonacionih sečiva

Dimenzije poprečnog preseka (mm)		Linearno eksplozivno punjenje (g/m)	Eksploziv RDX	Brzina detonacije (m/s)	Debljina sečenja / materijal (mm)
Širina	Visina				
8,00	7,00	12,00	RDX, grafit	6800	4,00 čelični lim
7,00	5,00	7,00	"	7050	3,50 čelični lim
6,00	4,00	6,00	"	7200	2,50 čelični lim
2,40	1,50	2,20	"	6400	1,60 čelični lim
2,00	1,30	0,85	"	6600	10,00 akrilno staklo

Karakteristični primeri opita provere efikasnosti detonacionog sečiva pri sečenju materijala različitih karakteristika prikazani su na slikama od 9 do 12. Pri takvim optima, pored efikasnosti detonacionog sečiva, posebno je proveravana homogenost eksplozivnog punjenja i osetljivost na inicijaciju detonatorskom kapislom. U svim optima detonaciono sečivo je u potpunosti zadovoljilo postavljene zahteve.

Primer 1



Slika 9. Sečenje aktinog stakla debljine 10 mm: detonaciono sečivo - dimenzija 2,00 x 1,30 mm; eksploziv - grafitirani heksogen linearne mase 0,85 g/m; inicijacija - detonatorskom kapislom br.8; brzina sečenja - 6600 m/s

Primer 2

Slika 10. Sečenje čeličnog lima debljine 2,00 mm: detonaciono sečivo - dimenzija 2,40x1,50 mm, eksploziv - grafitirani heksogen linearne mase 2,20 g/m; inicijacija - detonatorskom kapislom br.8; brzina sečenja - 6400 m/s

Primer 3

Slika 11. Sečenje komore protivgradne rakete (PGR): detonaciono sečivo dimenzija 2,90x1,85 mm; eksploziv - grafitirani heksogen linearne mase 2,95 g/m; inicijacija - detonatorskom kapislom br.8; brzina sečenja - 6650 m/s

U poređenju s primenjenim trakastim detonacionim štapinom za razbijanje komore PGR, ispitivano detonaciono sečivo potpuno seče komoru, a smanjuje maseno opterećenje komore za 3 do 4 puta.

Primer 4

Slika 12. Sečenje aviona čiji je radni vek istekao i kod kojih se ne bi isplatio generalni remont: detonaciono sečivo - dimenzija 6,00x4,00 mm, eksploziv - grafitirani heksogen linearne mase 6,00 g/m; inicijacija - detonatorskom kapislom br.8, brzina sečenja - 7200 m/s

Zaključak

Prikazani su i analizirani parametri koji direktno utiču na koncepciju rešenja i tehnološku realizaciju detonacionog sečiva kao diedarskog eksplozivnog punjenja.

Poseban cilj je bio realizacija detonacionog sečiva minimalne linearne mase grafitiranog heksogena (ispod 1,00 g/m) za sečenje različitih materijala u različitim uslovima.

Prikazani karakteristični primeri opita pri kojima je proveravana efikasnost detonacionog sečiva za različite namene, ilustruju njegovu efikasnost i ukazuju na mogućnost raznovrsne primene.

Literatura

- [1] DEFOURNEAUX, M. *Theorie elementaire des charges diedriques de decoupage*. Mem.Art.Fr., 1970, no.2.
- [2] DEFOURNEAUX, M., JACQUES, L. *Etude theorique et experimentale des explosifs*. Mem.Art.Fr. T-43, 1969, no 3.
- [3] LUKIĆ, M. *Projet de charges de decoupage*. ENSTA, Paris, 1973.
- [4] LUKIĆ, M. *Prilog ispitivanju izrade i karakteristika detonacionog sečiva*. Int. dok. OP-245, 1986, VTI VJ, Beograd.
- [5] KOSTIĆ, S., IGNJATOVIĆ, D. *Detonaciona sečiva za akrilna stakla*. Int. dok. L3-281-902-; 2000, VTI VJ, Beograd.

Rad primljen: 20.5.2002.god.

