

## Primena metode višekanalnog merenja vremenskih intervala pomoću električnih sondi za ispitivanje procesa detonacije

Vesna Džingalašević, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Zoran Jelača, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Dr Marinko Ugrčić, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Poslednjih se decenija mnogo pažnje, u svetu i kod nas, posvetilo razvoju metoda merenja kinetičkih parametara udarnog i detonacionog talasa, naročito brzine fronta talasa i masene brzine. U radu su predstavljeni primeri primene električnih sondi i logičkog analizatora pri eksperimentalnom određivanju parametara, kao što su: brzina udarnog/detonacionog talasa u materijalu ili vazduhu, oblik fronta talasa, brzina kumulativnog mlaza kroz metu, kao i karakterističnih vremena dejstva bojeve glave. Zaključeno je da se merna metoda može uspešno primenjivati u različitim uslovima merenja (parametar koji se određuje, sklop mernog uzorka...).

*Ključne reči:* detonacija, električna sonda, detonaciona brzina, brzina udarnog talasa, udarna adijabata.

### Uvod

PROSTIRANJE udarnog talasa kroz čvrst materijal objašnjava se jednostavnom hidrodinamičkom teorijom, koja pretpostavlja da je talas jednodimenzionalan i stacionaran. Parametri udarnog talasa povezani su preko poznatih jednačina o održanju mase, količine kretanja i energije. Razvoj metoda merenja kinetičkih parametara udarnog/detonacionog talasa – brzina fronta talasa i masena brzina – je veoma značajan, jer se određeni parametar direktno meri; samim tim moguće je odrediti pritisak, gustinu i energiju udarnog sabijanja, na osnovu relacija hidrodinamičke teorije.

Najdirektnije i najlakše se meri brzina udarnog/detonacionog talasa. Brzina fronta talasa može se odrediti merenjem brzine nekog fizičkog fenomena (svetlosti ili provodljivosti), koji se javlja kao prateći efekat fronta reakcije, ili merenjem brzine promene električnog parametra (otpornost ili kapacitivnost) električnog elementa koji je direktno izložen frontu reakcije.

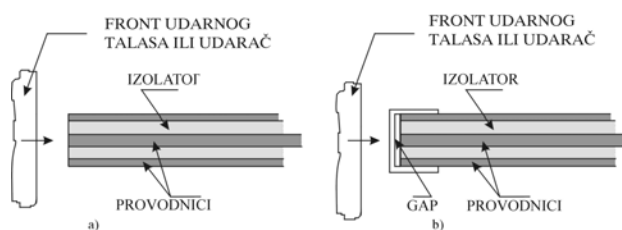
### Električne metode

Električne se metode, zbog svoje jednostavnosti najčešće primenjuju. Razvoj elektronskih uređaja sa vremenskom rezolucijom od 1 ns i manjom, značajno doprinosi tačnosti merenja.

Princip metoda zasniva se na sledećem: trenutni prolazak fronta talasa kroz određene tačke u materijalu, koje ograničavaju jednu ili više mernih baza, uzrok je formiranju električnog impulsa u mernom sistemu, koji se može registrovati na mernom uređaju, ili startovati i zaustaviti električni brojač. U pomenutim tačkama nalaze se sonde – davači koji reaguju na dinamičko opterećenje kojem su izložene.

Nekoliko tipova sondi može da se koristi kao detektori u

električnim metodama. Najčešće se koriste tzv. "pozicioni" davači, koaksijalne probe koje proizvode električni signal, kada se osetljivi deo sonde izloži dejstvu fronta udarnog/detonacionog talasa ili udarača. Prekidački i piezoelektrični tip sonde su u ovoj grupi. Za razliku od piezodavača, sonde prekidačkog tipa (jonizacione ili elektrokontaktne) treba konektovati sa spoljašnjim izvorom pobude. Na sl.1 predstavljena su, principijelno, dva tipa pozicionih davača.



Slika 1. Jonizaciona (a) i elektrokontaktna (b) sonda

U prostoru, ili u materijalu, nekoliko davača može da se sa velikom tačnošću pozicionira, tako da se tačno detektuje trenutak nailaska fronta talasa ili udarača.

### Princip višekanalnog merenja vremenskih intervala pomoću električnih sondi

Princip merenja sastoji se u merenju vremenskih intervala za koje front udarnog/detonacionog talasa ili udarača (u daljem tekstu *pobuda*) prolazi između dve tačke. S obzirom na poznato rastojanje između fiksnih tačaka, srednja brzina se računa kao odnos rastojanja sa izmerenim vremenskim intervalom.

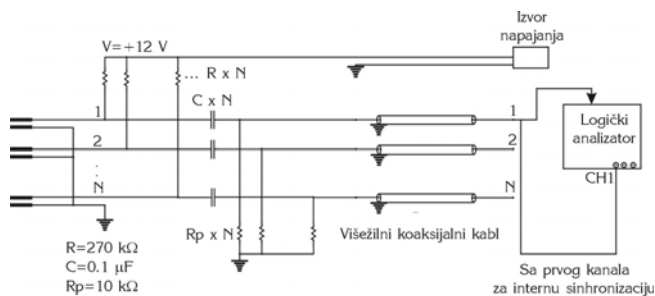
Elektrokontaktne sonde, sastavljene od dva provodnika s tankim izolacionim slojem koji ih razdvaja (sl.1), u

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

električnom pogledu predstavljaju otvoren električni kontakt, jer je otpornost izolacije reda 100 M $\Omega$ . Električni kontakt se uspostavlja u trenutku nailaska pobude, jer se izolacija između provodnika detektora probija (uništava). Elektrokontaktne sonde se inače razlikuju prema oblastima primene i zavise od mehanizma uspostavljanja upravo tog kontakta u konkretnom slučaju.

Jonizacione sonde takođe predstavljaju otvoren električni kontakt, koji se zatvara nailaskom elektroprovodljivih produkata detonacije na aktivni element sonde.

Električna sonda se priključuje u električno RC kolo prema sl.2, na kojoj se u sistemu nalazi N takvih kola.



Slika 2. Električno kolo sonde

Kondenzator  $C$  prethodno je napunjen na napon napajanja  $U$  (V), preko otpornika  $R$  i  $R_p$  ( $R \gg R_p$ ). Uspostavljanje kontakta između provodnika elektrokontaktne sonde pod dejstvom pobude izaziva naponski skok na otporu  $R_p$  usled pražnjenja kondenzatora sa vremenskom konstantom  $\tau = C \cdot R_p$ . Eventualni gubitak kontakta u daljem toku procesa nije od značaja, jer je registrovanje trenutka nailaska pobude upravo momenat naponskog skoka. Vreme porasta napona, zanemarujući uticaj parametara RC kola i priključnog kabla, zavisi od samog mehanizma uspostavljanja kontakta između provodnika sonde i u ovom slučaju malo utiče na tačnost metode.

Za registrovanje većeg broja trenutaka duž merne baze potrebno je električno RC kolo multiplicirati (sl.2). Pri tome se koriste nezavisne prenosne linije do mernog instrumenta, tako da je uspostavljena korespondencija svake sonde s određenim kanalom mernog instrumenta.

Kao merni instrument koristi se logički analizator, koji se inače koristi u digitalnoj elektronici, u funkciji višekanalnog brojača. Logički analizator funkcioniše tako što u vremenskim intervalima, prema sopstvenom taktu, testira naponske nivoe na svojim ulaznim kanalima, upoređuje ih i pridružuje logičkim stanjima "0" i "1". U ovom slučaju skok napona na otporu  $R_p$  kola na sl.2 tretira se kao promena logičkog stanja, a trenutak nastupanja promene može da se očita kao umnožak osnovnog takt signala.

Rezolucija merenja zavisi od frekvencije kojom uređaj ispituje stanja na ulaznim kanalima, što je definisano kao frekvencija uzorkovanja pri asinhronom radu.

Logički analizator omogućuje pouzdanija merenja u uslovima električnih smetnji, u odnosu na primenu elektronskog brojača, jer analizira stanja na ulaznim kanalima u toku celog vremenskog intervala. Tako signal sa sonde može da se razdvoji od slučajnog šuma, koji bi trigerovao brojač i doveo do greške kod merenja START - STOP metodom.

Logički analizator ima mogućnost istovremenog

memorisanja i analize više ulaznih digitalnih kanala (konkretno 80) sa maksimalnom frekvencijom uzorkovanja od 100 MHz, što znači da je maksimalna rezolucija 10 ns. Osim digitalnih ulaza, instrument poseduje dvokanalni digitalni osciloskop sa frekvencijom uzorkovanja maksimalno 200 MHz.

U metodi se koristi jedan kanal osciloskopa u režimu internog trigerovanja instrumenta (sa prvog kanala, odnosno sonde). To ujedno predstavlja referentno vreme pri merenju vremenskih intervala.

Multikoaksijalni kabl, koji se koristi za prenos signala iz RC kola, sastoji se od dva provodnika za napajanje i 40 koaksijalnih kablova tipa RG 178B/U sledećih karakteristika: karakteristična impedansa je 50  $\Omega$ ; slabljenje pri 400 MHz je 92 dB/10 m; kapacitivnost je reda 92 pF/m.

### Merenje brzine prostiranja udarnog talasa kroz materijal – određivanje udarnih adijabata materijala

Merenja su sprovedena radi određivanja zavisnosti pritiska udarnog talasa od debljine pleksiglasa, proizvedenog u ICN Galenika, gustine  $\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$ , dinamički opterećenog generatorom ravnog detonacionog talasa (GRDT) [1], prečnika 50 mm, radi izvođenja kalibracione krive za visokoomsku manganin sondu domaće proizvodnje [2]. Zavisnost  $P(x)$  za pleksiglas određena je korišćenjem rezultata elektromagnetne metode i merenjem brzine fronta udarnog talasa kroz pleksiglas.

U uzorak od pleksiglasa cilindričnog oblika, prečnika 50 mm, visine 62.5 mm, ugrađene su sonde, tip EK-1, izrađene u Institutu za fiziku, Zemun. Ugrađeno je 16 sondi raspoređenih po koncentričnim krugovima i na različitim rastojanjima  $x$  od granice eksplozivno punjenje - pleksiglas, sl.3a.

U radu je istaknuto da nije poznat uticaj većeg broja sondi (a sigurno postoji), raspoređenih u različitim ravnima normalnim na osu simetrije ispitnog uzorka, na prostiranje udarnog talasa.

U tabeli 1 predstavljeni su rezultati merenja masene i brzine fronta udarnog talasa u pleksiglasu.

Udarne adijabata za korišćeni pleksiglas je predstavljena na sl.3b i data je izrazom:

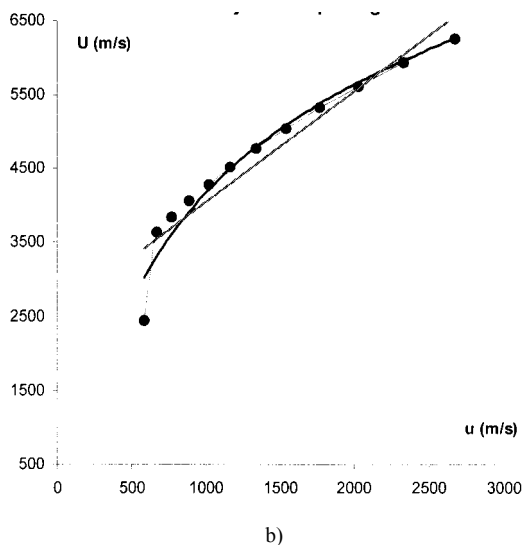
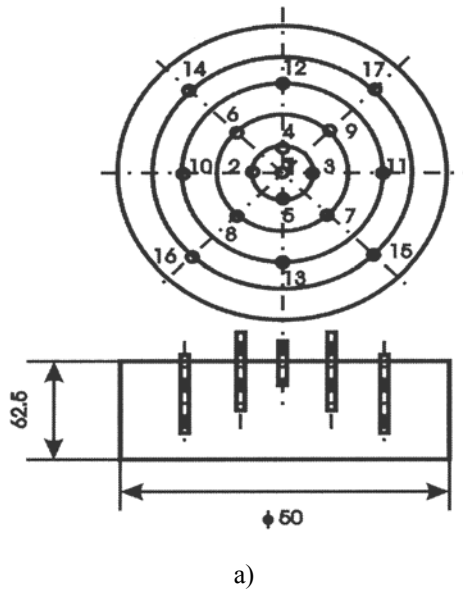
$$U \text{ (m/s)} = 278.06 \cdot u^{0.39} \cong A_0 + \lambda x u = 2839.2 + 1.35 x u$$

gde je  $A_0$  brzina zvuka u materijalu u uslovima kompresije, a  $\lambda$  konstanta za dati materijal.

Tabela 1. Rezultati dobijeni pri određivanju udarne adijabate za pleksiglas

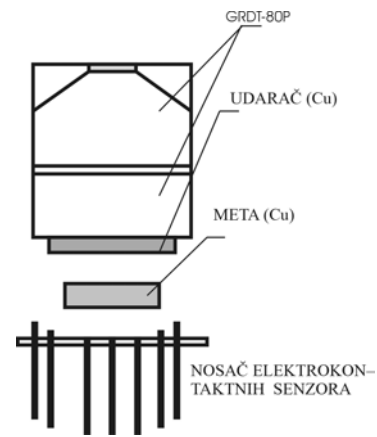
Debljina pleksiglasa $x$ (mm)	Masena brzina $u$ (m/s)	Brzina udarnog talasa $U$ (m/s)
5	2667.74	6269.39
10	2323.86	5936.85
15	2024.34	5621.95
20	1763.38	5323.75
25	1536.07	5041.37
30	1338.07	4773.97
35	1165.69	4520.75

40	1015.35	4280.97
45	884.47	4053.89
50	770.46	3838.87
55	671.14	3635.16
60	584.63	2442.43



Slika 3. a) Sklop uzorka od pleksiglasa sa ugrašenim elektrokontaktnim sondama; b) udarna dijabata za pleksiglas

Kao drugi primer, naveden je eksperiment određivanja udarne adijabate metala, konkretno bakra, primenom GRDT prečnika 80 mm (GRDT-80P), presovana varijanta [1,3]. Na sl.4 predstavljena je skica mernog uzorka.



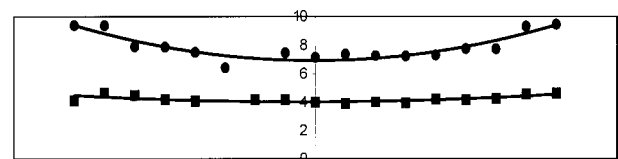
Slika 4. Skica mernog uzorka za ispitivanje udarne adijabate u metalima pomoću GRDT-80P

Primenjena je metoda "kočenja" - GRDT svojom eksplozijom odbacuje udarač prema meti određenom brzinom. Kretanje udarača registruje se pomoću elektrokontaktnih sondi postavljenih u nosaču mete. Preko RC kola generiše se impuls, koji se očitava na logičkom analizatoru. Očitavanjem rezultata dobijaju se vremenski intervali pristizanja udarača na sonde, te se određuje brzina kretanja udarača.

U meti se nalazi sklop elektrokontaktnih sondi postavljenih na različitim rastojanjima od čela mete - registruje se kretanje udarnog talasa kroz nju, te se određuje brzina fronta talasa. Dobijene vrednosti brzine korišćene su za određivanje udarne adijabate za bakar.

Na sl.5 predstavljen je oblik deformacije bakarne pločice – bakarna pločica, koja je od nosača sondi smeštenih u istoj ravni bila udaljena 10 mm, manje se deformisala od one koja je bila na rastojanju 30 mm od nosača sondi. Posebno je taj efekat uočljiv na krajevima pločice, usled uticaja talasa reflektovanih od ivice eksplozivnog punjenja.

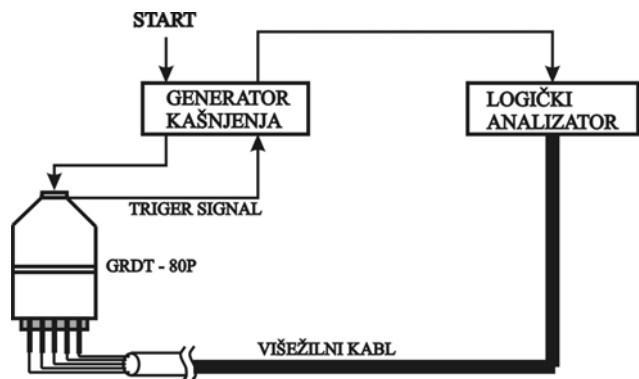
Iniciranje GRDT-80P izvršeno je pomoću inicijatora koji ima tačno utvrđeno vreme indukcije (što je neophodno radi sinhronizacije vremena odvijanja pojedinih delova procesa).



Slika 5. Deformacija bakarne pločice odbačene eksplozivom (gore: pločica na rastojanju 30 mm od nosača sondi; dole: pločica na rastojanju 10 mm od nosača sondi)

### Ispitivanje oblika fronta detonacionog talasa primenom jonizacionih sondi

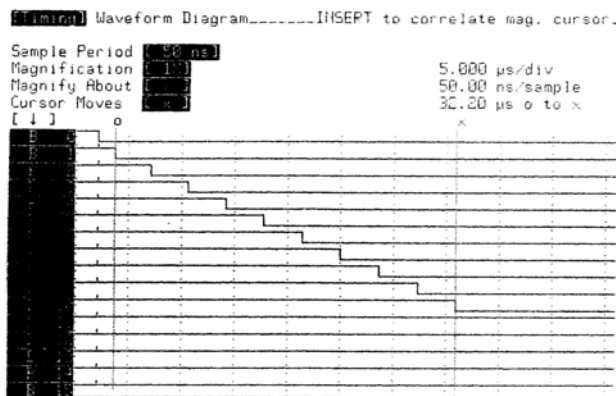
U opitu, čija je blok šema predstavljena na sl. 6a, ispitan je oblik fronta detonacionog talasa u slučaju GRDT-80P. Na sl.6b dat je primer registrovanih vremenskih intervala - signala sa 13 jonizacionih sonde ugrađenih u pleksiglas po koncentričnim krugovima upravno na pravac prostiranja fronta talasa, a sa aktivnim elementima u istoj ravni (na istom rastojanju od granične površine eksplozivno punjenje – pleksiglas).



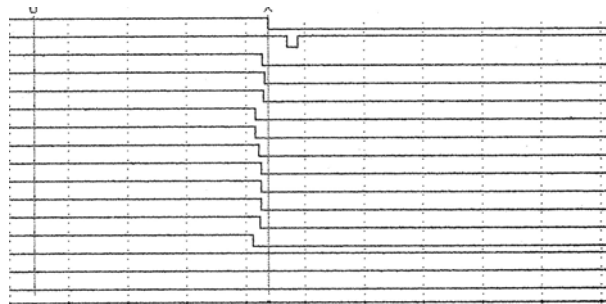
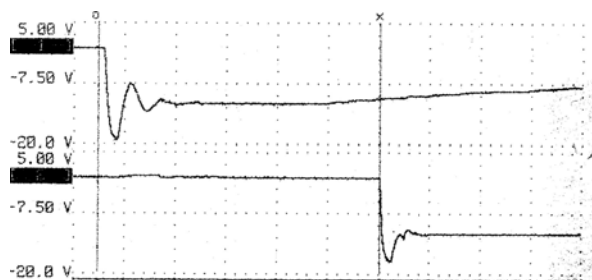
Slika 6. a) Blok šema mernog sistema za određivanje oblika fronta detonacionog talasa GRDT .- 80P

### Ispitivanje razvoja procesa detonacije u eksplozivnom punjenju

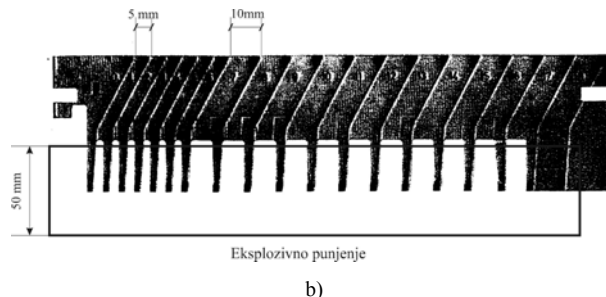
Postavljanjem jonizacionih sonde na više sukcesivnih mernih baza duž eksplozivnog punjenja, može da se ispita razvoj detonacionog procesa od trenutka iniciranja detonacije do uspostavljanja stacionarnog talasa [4-7]. Na sl.7a predstavljen je primer registrovanih rezultata merenja.



a)



Slika 6. b) signali registrovani sa 13 jonizacionih sonde

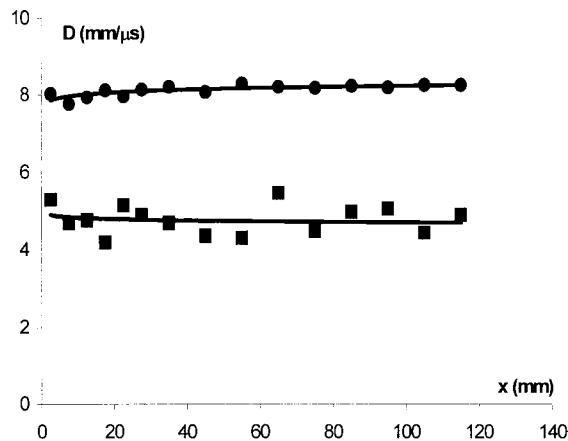


b)

Slika 7. a) Primer registrovanih signala dobijenih pri ispitivanju razvoja detonacionog procesa; dat je i primer signala sonde registrovan digitalnim osciloskopom; b) "češalj" ugrađen u eksplozivno punjenje.

U Vojnotehničkom institutu VJ je razvijen tzv. "češalj" – dvoslojna štampana ploča debljine 0.6 mm, koja predstavlja sistem jonizacionih sonde (sl.7b). Na taj način trebalo je da se izbegne svaka greška pri određivanju merne baze, koja potiče od neadekvatnog pozicioniranja svake sonde posebno.

Na sl.8 predstavljen je primer analiziranih rezultata merenja dobijenih primenom "češlja", koji je u procesu livenja ugrađen u eksplozivno punjenje, prema rezultatima iz tabele 2.



Slika 8. Razvoj procesa detonacije za eksplozivna punjenja HMX/PU 80/20 (gore) i PETN/Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>/PU 20/60/20 (dole)

Tabela 2: Primeri rezultata dobijenih pri ispitivanju razvoja procesa detonacije u eksplozivnom punjenju

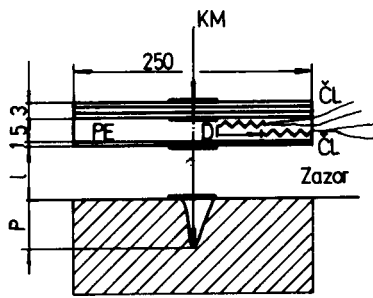
Položaj sonde u eksplozivnom punjenju x (mm)	Brzina fronta detonacionog talasa u sastavima, D (mm/μs):	
	HMX/PU 80/20 ρ = 1607 kg/m <sup>3</sup>	PETN/Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> /PU 20/60/20 ρ = 2052 kg/m <sup>3</sup>
2.5	8.038	5.29
7.5	7.764	4.69
12.5	7.936	4.76
17.5	8.117	4.20
22.5	7.962	5.15
27.5	8.143	4.90

35	8.210	4.69
45	8.077	4.36
55	8.292	4.31
65	8.210	5.46
75	8.183	4.48
85	8.237	4.97
95	8.197	5.05
105	8.264	4.44
115	8.264	4.90

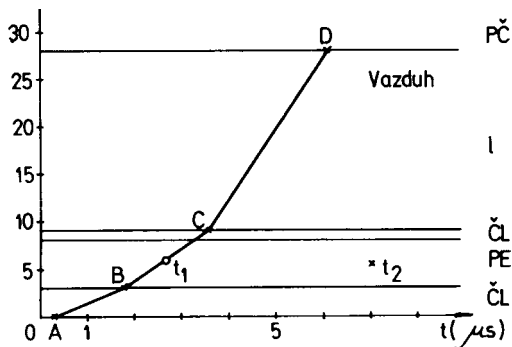
### Ispitivanje uticaja kumulativnog mlaza na kasetu eksplozivno - reaktivnog oklopa (ERO)

Brzina kumulativnog mlaza kroz sistem model kasete ERO – pancirna ploča određivana je metodom merenja sukcesivnih vremenskih intervala pomoću elektrokontaktne sonde. U opitima su korišćene i jonizacione sonde, radi registrovanja trenutaka inicijacije eksploziva i merenja brzine detonacionog talasa kroz eksplozivno punjenje [8]. Variranjem pojedinih parametara u sistemu model kasete ERO – – pancirna ploča (konfiguracija kasete, debljina osnovice kasete, materijal između kasete i pancirnog čelika, kao i promena debljine tog materijala...) ispitana je promena toka prodiranja kumulativnog mlaza bojeve glave BG *Zolja* kroz različite sredine; određeni su trenutak inicijacije – detonacije eksplozivnog punjenja u modelu kasete. Na sl.9 je predstavljena skica jedne od konfiguracija sistema model kasete ERO – pancirna ploča, kao i primer dijagrama promene brzine kumulativnog mlaza (KM) pri prolasku kroz različite sredine.

Elektrokontaktne sonde su tipa folije: provodnici su bakarne folije, debljine 100  $\mu\text{m}$ , između kojih je izolator od PVC materijala. Jonizacione sonde su od upredene, lakom izolovane žice (SNO 1475).



a)



b)

Slika 9. a) Skica konfiguracije sistema model kasete ERO – pancirna ploča; b) dijagram promene brzine kumulativnog mlaza

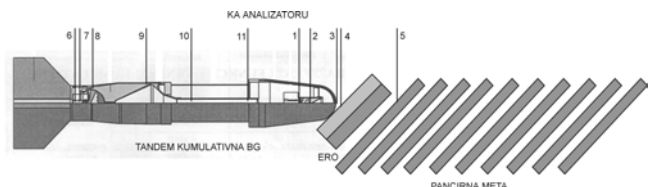
U navedenom opitu dobijeni su sledeći podaci:

- Brzina prodiranja mlaza od A do B: – 2.00 mm/ $\mu\text{s}$ ,
- od B do C: - 3.39 mm/ $\mu\text{s}$ ,
- od C do D: - 7.42 mm/ $\mu\text{s}$ ;
- $\bar{l} = 19$  mm (vazduh)
- Proboj pancirne ploče  $P > 200$  mm;
- $t_1 = 2.665$   $\mu\text{s}$  - momenat prolaska kumulativnog mlaza kroz središnji deo eksplozivnog punjenja;
- $t_2 = 7.00$   $\mu\text{s}$  - trenutak aktiviranja jonizacione sonde udaljene 20 mm od središnjeg dela eksplozivnog punjenja.

Rezultati ovih eksperimenata, zajedno sa rezultatima dobijenim optičkom metodom i impulsnom rendgenografijom, značajno su doprineli razvoju kasete ERO.

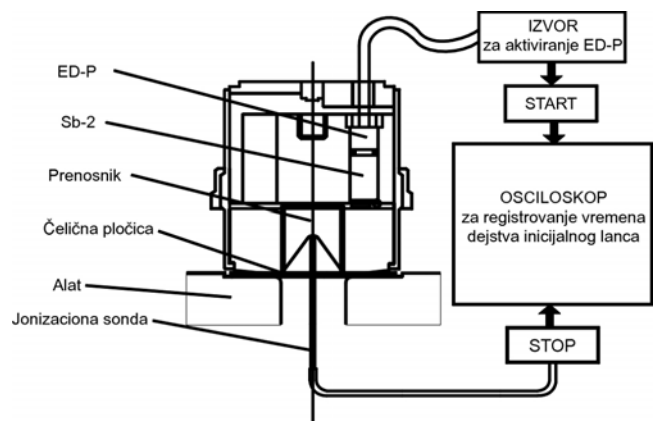
### Ispitivanje sinhronizacije dejstva kumulativnog punjenja u tandem - kumulativnoj bojevoj glavi

Metodom sa višekanalnim logičkim analizatorom određivana su vremena dejstva inicijalnog lanca osnovnog kumulativnog punjenja u tandem-kumulativnoj bojevoj glavi, kao i karakteristična vremena dejstva bojeve glave [9]. Merenja su sprovedena u cilju potvrde teorijski određenog vremena kašnjenja osnovnog kumulativnog punjenja BG, radi efikasnog neutralisanja ERO. U opitima su korišćene jonizacione sonde, tip JS-1, izrađene u *Institutu za fiziku, Zemun* (ugrađene u eksplozivno punjenje u BG), elektrokontaktne sonde tipa folije, kao i sonde specijalno konstruisane da bi se mogle ugraditi u cev BG (sonde broj 10 i 11, sl.10).



Slika 10. Položaj električnih sondi u tandem-kumulativnoj BG pri određivanju karakterističnih vremena dejstva BG

Takođe, u ovoj seriji eksperimenata izvršena su i merenja vremena dejstva inicijalnog lanca u upaljaču kumulativnog predpunjenja i osnovnog punjenja s ugrađenim inicijatorima ED - P i IED - 2. Blok šema provere potpunosti detonacije i merenja vremena dejstva inicijalnog lanca predstavljena je na sl.11.



Slika 11. Blok šema provere potpunosti detonacije u inicijalnom lancu

Provera je izvršena sa modifikovanim upaljačem UT-PE M91SP u koji je ugrađena električna inicijalno-detonatorska kapisla IED-2. Inicijalni impuls se sa kapisle direktno prenosi na pentritski pojačavač inicijalno-detonatorskog sklopa kumulativne bojeve glave 120 mm, M91.

Ispitano je i rezervno rešenje, inicijalni lanac sastavljen od električnog inicijatora ED-P i pentritskog pojačavača Sb-2 u upaljaču, sl.11. Pri ispitivanjima dobijena su sledeća vremena dejstva inicijalnog lanca:

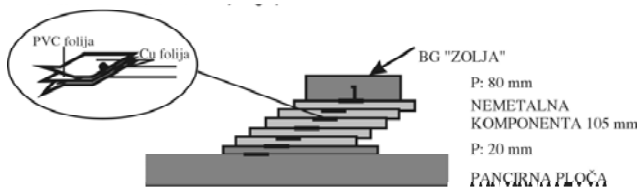
- sa inicijatorom ED-P:  $T$  ( $\mu$ s) = 6.38; 7.36; 6.92; 7.46; 7.42; to jest  $T_{sr} = 7.108 \mu$ s;
- sa inicijatorom IED-2:  $T$  ( $\mu$ s) = 6.62; 7.02; to jest  $T_{sr} = 6.82 \mu$ s.

Dobijeni rezultati potvrdili su činjenicu da obe varijante upaljača ispunjavaju uslove vezane za pravilnu funkciju, visoku trenutnost dejstva i malo rasturanje vremena dejstva inicijalnog lanca.

### Ispitivanje uticaja različitih vrsta nemetalnih komponentata u tzv. "sendvič" oklopu na brzinu prostiranja i probojnost kumulativnog mlaza

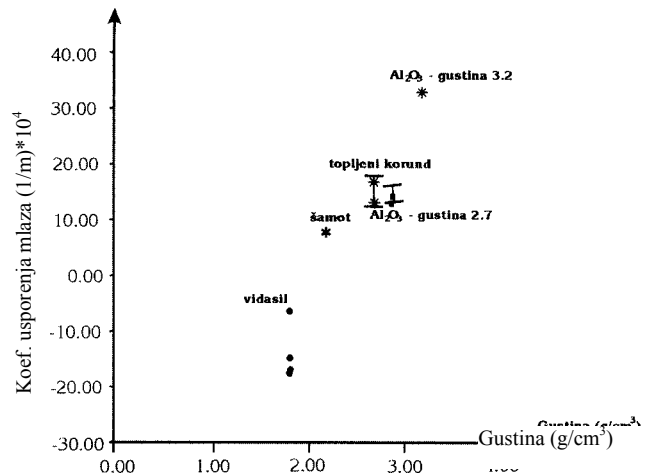
"Sendvič" oklop predstavlja konfiguraciju pancirni čelik (HP-4), debljine 80 mm – nemetalni keramički uložak, debljine 105 mm – pancirni čelik, debljine 20 mm. Ispitivanja su sprovedena na modelima sa različitim materijalima ( $Al_2O_3$ , korund topljeni, SiC, šamot HV 40, vidasil...); elektrokontaktne sonde tipa folije, slika 12, postavljene su tako da se odredi promena brzine čela kumulativnog mlaza usled uticaja različitih materijala.

1-elektrokontaktna sonda tipa folije



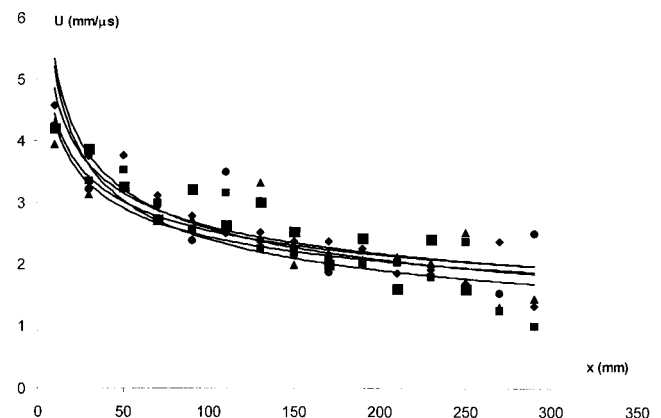
Slika 12. Primer konfiguracije „sendvič“ oklopa sa ugrađenim elektrokontaktним sondama

Na sl.13 predstavljena je zavisnost tzv. koeficijenta usporenja kumulativnog mlaza od gustine keramičkog uloška.



Slika 13. Zavisnost koeficijenta usporenja kumulativnog mlaza od gustine nemetalne komponente

Ova metodologija primenjena je i na određivanje brzine kumulativnog mlaza kroz pancirni čelik, sl.14. U tabeli 3 predstavljene su rezultati brzine kumulativnog mlaza u funkciji debljine pancirnog čelika.



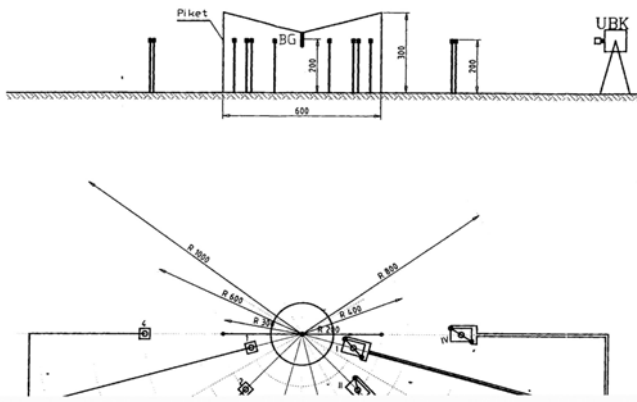
Slika 14. Rezultati merenja brzine kumulativnog mlaza bojeve glave Zolja u funkciji debljine pancirnog čelika

Tabela 3. Rezultati određivanja brzine kumulativnog mlaza bojeve glave Zolja kroz pancirni čelik HP - 4.

Debljina čelika $x$ (mm)	Brzina kumulativnog mlaza bojeve glave Zolja $U$ (mm/ $\mu$ s)				
	10	4.566	3.940	4.200	4.200
30	3.740	3.120	3.350	3.860	3.220
50	3.760	/	3.530	3.260	3.240
70	3.115	/	2.990	2.730	2.950
90	2.790	2.720	2.580	3.220	2.390
110	2.500	2.640	3.160	2.640	3.496
130	2.520	3.310	2.260	3.010	2.390
150	2.370	1.990	2.240	2.540	2.150
170	2.370	2.180	2.060	2.010	1.870
190	2.260	2.080	2.010	2.430	/
210	1.860	2.120	2.030	1.610	/
230	1.920	2.020	1.800	2.420	/
250	1.700	2.520	2.380	1.610	/
270	2.380	1.310	1.260	/	1.530
290	1.320	1.450	1.000	/	2.500

## Određivanje brzine udarnog talasa u vazduhu, formiranog ekspanzijom aerosolnog oblaka

Ispitivanje efikasnosti pešadijskog bacača RPO-A obuhvatalo je i merenje brzine vazdušnog udarnog talasa pomoću specijalno izrađenih elektrokontaktne sondi, sl.15.



Slika 15. Šema rasporeda elektrokontaktne sondi pri merenju brzine vazdušnog udarnog talasa

Kontakt među provodnicima sonde uspostavlja se usled dejstva vazdušnog talasa: bakarna folija se poput membrane ulegne i dodirne bakarnu cevčicu. Zbog manjeg intenziteta pritiska udarnog talasa na većim rastojanjima, na mernim mestima udaljenijim od BG, umesto bakarne folije korišćena je Al folija za domaćinstvo.

### Diskusija rezultata

Interesantno je da je i danas primena električnih sondi pri ekperimentalnom ispitivanju u oblasti fizike detonacionog i udarnog talasa izuzetno velika, iako su razvijene mnogo preciznije merne tehnike, kao što je, na primer, laserska interferometrija. Naime, pri ekstremnim vrednostima brzine i pritiska, skoro je jednaka preciznost obe metode.

Električne sonde - jonizacije i elektrokontaktne - međusobno se razlikuju prema mehanizmu uspostavljanja električnog kontakta i, prema tome, oblasti primene. Izvesno je da pri detonaciji čvrstih eksplozivnih materija nastaje zona visoke provodljivosti, koja se javlja usled termičke jonizacije, hemijske reakcije i velike gustine materije. Prema [10], ova zona se poklapa sa frontom detonacionog talasa s tačnošću od 10 do 30 ns; specifična provodnost plazme je od  $0.1$  do  $9.3 (\Omega\text{cm})^{-1}$  čak i do 2 mm iza fronta talasa. Visoka elektroprovodljivost produkata detonacije omogućuje uspostavljanje električnog kontakta u slučaju jonizacionih sondi, te se one primenjuju za detekciju nailaska detonacionog talasa.

Širina vazdušnog uključka (GAP) na jonizacionoj sondi je obično od 1 mm do 3 mm. Kada se sonda ugrađuje u eksplozivno punjenje, poželjno je da dimenzije vazdušnog zazoru budu nekoliko puta veće od najvećih granula eksploziva, koje izazivaju neregularnost fronta detonacionog talasa (koji ima oblik haotične, pulsirajuće površine, naročito kod heterogenih eksploziva [11]).

Kada je u pitanju slaba detonacija, elektroprovodljivost talasa nije dovoljna da na nju reaguje aktivni element sonde, te u tom slučaju one nisu upotrebljive.

Prilikom ispitivanja raznih gasodinamičkih procesa i, u okviru toga, merenja brzine slobodne površine udarača ili brzine udarnog talasa, upotrebljavaju se elektrokontaktne

sonde. Takođe, s obzirom da je kumulativni mlaz dobar električni provodnik, uspostavlja se električni kontakt (zatvara se električno kolo sonde) u trenutku proboja kumulativnog mlaza kroz izolaciju između elektroda sonde i stoga se one mogu primeniti i pri merenju brzine mlaza duž mete.

Od precizne ugradnje/postavljanja sonde u merni uzorak ili sklop zavisi tačnost merne metode. Ako su sonde postavljene po koncentričnim krugovima na različitom rastojanju od granice eksplozivno punjenje - nosač sondi, ili duž punjenja, tada se meri brzina prostiranja neke *pobude*, te je vrlo važno merne baze precizno odrediti. Radi tačnijeg određivanja merne baze, u *VTI VJ* je korišćen "češalj", koji po svojim dimenzijama (naročito debljini štampane ploče, koja je u okviru dozvoljenih vrednosti za vazdušni zazor) zadovoljava zahteve za preciznošću. Ako se određuje oblik preoblikovanog fronta talasa, potrebno je aktivne elemente sondi postaviti u istu ravan, da bi se električni kontakt u svim sondama uspostavio istovremeno.

Tačnost metode zavisi, pored rezolucije mernog sistema, i od izbora vrednosti elemenata  $R_p$  i  $C$  (sl.2). Vreme pražnjenja kondenzatora treba da je kraće od intervala između dva uzastopna signala sonde. Vreme uspona prednje ivice signala pražnjenja kondenzatora (sl.6a) je mera pouzdanosti odziva električne sonde – ono treba da je reda nekoliko desetina ns.

Primena logičkog analizatora omogućuje pouzdanija merenja u uslovima električnih smetnji od višekanalnog električnog brojača, budući da analizira stanja na ulazu tokom celog vremenskog intervala. Na taj način lako se izdvaja signal sonde od slučajnog šuma, koji može da trigeruje električni brojač, što dovodi do velike greške u merenju. Takođe, prednost logičkog analizatora dolazi do izražaja kada vremena pristizanja fronta talasa na aktivne elemente sonde nisu međusobno pomešana (primer na sl.6), te su promene napona na otporniku RC kola skoro istovremene.

S obzirom da se pri ovakvoj vrsti merenja uglavnom koriste kablovi (koji povezuju sonde sa RC kolom) dužine i do 50 m, neophodno je da oni budu koaksijalnog tipa da bi se izbeglo preslikavanje.

### Zaključak

Sprovedena su brojna ekperimentalna merenja primenom mernog sistema koji se sastoji od sledećih osnovnih elemenata: električnih sondi (jonizacionih ili elektrokontaktne), RC kola i logičkog analizatora u funkciji digitalnog osciloskopa i višekanalnog električnog brojača. Rezultati ovih ispitivanja ukazuju na to da se ovakav merni sistem može uspešno primeniti za određivanje udarnih adijabata materijala, ispitivanje oblika fronta udarnog/detonaci-onog talasa, razvoja procesa detonacije u eksplozivnom punjenju, merenje brzine kumulativnog mlaza kroz homogenu ili heterogenu metu, brzine udarnog talasa u vazduhu...

Uslovi merenja u konkretnom slučaju određuju tip sonde koja će se primeniti, konfiguraciju i raspored sondi u mernom uzorku/sklopu, a neretko je potrebno osmisliti novi oblik i konfiguraciju primenjene sonde. Ispravnost u odabiru tipa sonde i njenom obliku proverava se snimanjem odziva sonde na digitalnom osciloskopu i određivanjem vremena uspona signala sonde. Zato je pri svakom eksperimentu neophodno pratiti oblik ovog signala na nekoj od upotrebljenih sondi (ukoliko neka sonda trigeruje merni sistem, ona obavezno mora biti obuhvaćena proverom).

### Literatura

- [1] ANASTASIJEVIĆ, S. *Ispitivanje eksplozivnog modela sa preoblikovanim frontom detonacionog talasa*. Int.dok. TI-958, VTI Beograd, 1988.
- [2] DŽINGALAŠEVIĆ, V. *Osvajanje metode merenja pritiska udarnog i detonacionog talasa primenom manganin sonde*. Int.dok. TI-959, VTI Beograd, 1988.
- [3] ŽAKULA, B., STANIĆ, G., ČAJETINAC, S. *Studija generisanja ravnog detonacionog talasa u dvodelnom eksplozivnom punjenju*. 17. simpozijum o eksplozivnim materijama, 1988, p. 64.
- [4] BLAGOJEVIĆ, M., ANASTASIJEVIĆ, S., DŽINGALAŠEVIĆ, V. *Parametri detonacije kompozitnih livenih eksploziva odabranog sastava na bazi poliuretana i oktogena*. 18. simpozijum o eksplozivnim materijama, 1990, p. 21.
- [5] AZDEJKOVIĆ, M. *Ispitivanje osetljivosti na inicijaciju i parametara detonacije oktolitskih eksplozivnih punjenja*. 18. simpozijum o eksplozivnim materijama, 1990, p. 27.
- [6] ANTIĆ, G., BLAGOJEVIĆ, M. *Liveni kompozitni eksplozivi niske brzine detonacije*. 18. simpozijum o eksplozivnim materijama, 1990, p. 35.
- [7] STANOJEVIĆ, D., ČAJETINAC, S., JELAČA, Z. *Eksperimentalno određivanje nekih parametara detonacionog talasa*. 17. simpozijum o eksplozivnim materijama, 1988, p. 74.
- [8] UGRČIĆ, M., MILIČIĆ, G., JANEV, J., DŽINGALAŠEVIĆ, V. *Projekat Vihor - izveštaj o istraživanju efekata interakcije kumulativni mlaz - ERO*. Int. dok. VTI-01-0329, VTI Beograd, 1991.
- [9] UGRČIĆ, M., VUKOTIĆ, V., DŽINGALAŠEVIĆ, V., JELAČA, Z. *Eksperimentalno istraživanje funkcije tandem - kumulativne bojeve glave*. 20. simpozijum o eksplozivnim materijama, 1997, p. 330.
- [10] ZUBKOV, P.I., LUKJANČIKOV, L.A., NOVOSELOV, B.S. *Elektroprovodnost v zone detonacii kondensirovannih vv. Fizika gorenija i vzriva*, 1971, vol.7, no.2, pp. 295-299.
- [11] DREMIN, A.N. *Detonacionie volni v kondensirovannih sredah*. Moskva, "Nauka", 1970.

Rad primljen: 17.4.2002.god.



