

UDK: 662.215.2.001.4:662.1/.4(047)=861
COSATI: 19-04, 19-01, 14-02

Eksperimentalno određivanje parametara detonacije livenih eksplozivnih smeša

Vesna Džingalašević, dipl.inž.¹⁾
Gordana Antić, dipl.inž.¹⁾

Savremenim metodama određivanja parametara detonacije - elektromagnetnom metodom sa impulsnim magnetnim poljem i metodom sa niskoomskom manganin sondom, određene su detonacione karakteristike livenih eksploziva na bazi trinitrotoluena (TNT) i elastičnih eksploziva na bazi heksogena, oktogena i poliuretanskog elastomera, koji se laborišu tehnologijom livenja. Sagledan je uticaj sastava, strukture i fizičko-hemijskih karakteristika eksplozivnog punjenja na strukturu detonacionog talasa i veličinu njegovih osnovnih parametara.

Ključne reči: Eksploziv, liveni eksplozivi, elastični eksplozivi, detonacija, parametri detonacije, elektromagnetna metoda, manganin metoda.

Uvod

NEPOSREDNO istraživanje mehanizma i kinetike hemijskog razlaganja brizantnih eksploziva u uslovima dinamičkog opterećenja ima poseban naučni i praktični značaj.

Brzina hemijskog razlaganja prati se na osnovu promene parametara u toku procesa iza čela udarnog talasa [1,2], odnosno direktnim registrovanjem i analizom profila detonacionog talasa. U saglasnosti sa hidrodinamičkom teorijom detonacije, koju su postavili Zeljdovič - Von Neumann - Döring (tzv. ZND teorija), front detonacionog talasa predstavlja površinu intenzivnog prekida koja odvaja polaznu eksplozivnu materiju od produkata detonacije. Ovu površinu karakterišu: nagli skok pritiska u frontu, stacionarna zona hemijske reakcije i na njenom kraju Chapman - Jouguet ravan (CJ ravan) i nestacionarna zona širenja produkata detonacije (Taylerov automodalni talas razređenja). Eksperimentalna potvrda ovakve strukture detonacionog talasa dobijena je u mnogobrojnim radovima iz dostupne literature.

Indirektno ili direktno merenje osnovnih parametara detonacije i registracija zone povišenih pritisaka (himpik ili hemijska zona) predstavljaju osnovne praktične zadatke u proučavanju dinamičkih i relaksacionih procesa koji se odvijaju pri detonaciji brizantnog eksploziva. Za njihovu realizaciju primenjuju se mnogobrojne dinamičke metode, zasnovane na različitim fizičkim principima: metoda "otkola" ili pregrada, elektromagnetna metoda, manganin metoda, cilindar test, laserska interferometrija i dr. Brzina detonacije D za tačno definisanu gustinu eksplozivnog punjenja ρ_0 može se sa velikom preciznošću meriti, a ostale karakteristike stacionarne detonacije nalaze se eksperimentalnim određivanjem jednog od sledeća dva parametra: brzine produkata detonacije u_{CJ} i pritiska detonacije P_{CJ} . Znajući njihove vrednosti, na osnovu relacija hidrodinamičke teorije deto-

nacije mogu se izračunati i ostali detonacioni parametri za uslove CJ : gustina produkata detonacije, širina zone hemijske reakcije i pokazatelj politrope.

Registracija parametara u CJ ravni pri detonaciji brizantnih eksploziva praćena je određenim teškoćama principijelnog i tehničkog karaktera. Naime, evidentirana je disperzija rezultata merenja istog parametra, dobijenog primenom različitih eksperimentalnih metoda [3-6]. To jasno ukazuje na neophodnost utvrđivanja strukture detonacionog talasa i jednoznačnog određivanja CJ stanja. Pri tome treba uzeti u obzir činjenicu da postoji složena zavisnost između veličine parametara detonacionog talasa i fizičko-hemijskih karakteristika eksplozivnog punjenja, kao i uslova u kojima se detonacija odvija i ispituje.

Najpreciznije izučavanje procesa detonacije omogućava elektromagnetna metoda i, u skladu sa tim, ima najširu primenu u ovoj oblasti istraživanja. Na osnovu odziva elektromagnetne sonde i dobijenog zapisa $u(t)$ mogu se pouzdano odrediti masena brzina u zoni hemijske reakcije, u CJ ravni i iza nje, vreme hemijske reakcije, ali i zaključivati o mehanizmu procesa i uticaju sastava, gustine i strukture eksplozivnog punjenja na parametre detonacionog talasa.

Prezentirani su i analizirani rezultati ispitivanja parametara detonacije livenih eksploziva u funkciji njihovog sastava, dobijeni elektromagnetnom metodom. Razmatrani su konvencionalni sastavi na bazi TNT, sa ili bez inertnih dodataka, koji široku primenu nalaze u sredstvima naoružanja (oktoliti, pentoliti, HBX sastavi) i elastični kompozitni eksplozivi na bazi RDX (HMX) i poliuretanskog elastomera, laborisani tehnologijom livenja.

Takođe su prezentirani rezultati merenja pritiska stacionarne detonacije elastičnih eksploziva i data je uporedna ocena veličine ovog parametra direktno određenog manganin metodom i indirektno proračunatog na osnovu rezultata merenja masene brzine elektromagnetnom metodom.

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

Metode određivanja parametara detonacije

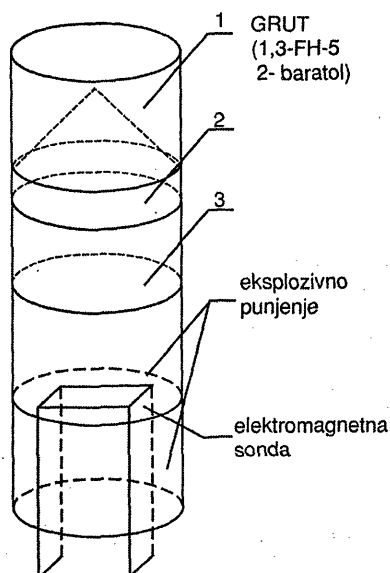
Parametri detonacije eksplozivnih punjenja određeni su primenom metoda osvojenih i razvijenih u *Vojnotehničkom institutu VJ* [7-9].

Merenje brzine detonacije

Brzina detonacije određena je pomoću elektronskog brojača [7], primenom elektrokontaktne sonde [8] postavljenih u eksplozivno punjenje u zoni stabilne detonacije.

Određivanje brzine produkata detonacije

Brzina produkata detonacije određena je primenom metode sa impulsnim magnetnim poljem [9]. Elektromagnetna sonda, izrađena od bakarne folije debljine ispod 120 μm , ugrađena je u eksplozivno punjenje tokom njegove laboracije, sl.1.



Slika 1. Skica uzorka za određivanje brzine produkata detonacije

Dimenzije sonde (širina 5 mm, dužina aktivnog dela ≈ 15 mm) su tako odabrane da talasi bočnog razređenja ne remete odziv sonde u oblasti fronta detonacionog talasa i zoni hemijske reakcije; sonda ne remeti proces reaktivnog toka, već tačno registruje promene parametra detonacionog talasa. Sonda je izrađena od bakarne folije, iako je u literaturi češće predstavljena primena sonde od aluminijumske folije, jer je utvrđeno [10] da aluminijum može da reaguje sa produktima eksplozije i tako redukuje provodljivost aktivnog dela sonde.

Vreme uspona signala-odziva sonde zavisi od električnih karakteristika mernog sistema (kao i fizičkih i hemijskih kinetičkih osobina ispitivanog eksplozivnog sastava) i iznosi ≈ 30 ns za primenjeni sistem. Ovo vreme treba da je kraće od polovine vremena zone hemijske reakcije, da bi se ovaj parametar, kao i vrednosti u Chapman-Jouguet (CJ) tački, dovoljno precizno odredili.

Kao buster punjenje upotrebljen je generator ravnog detonacionog talasa [11].

Radi poređenja, predstavljeni su i rezultati određivanja brzine produkata detonacije metodom sa homogenim permanentnim magnetnim poljem [12], koja se ranije primenjivala.

Pri merenjima je vrednost magnetne indukcije $B=81.3-82.5$ mT i konstantna je za datu seriju opita.

Vrednost aktivnog dela sonde je $l=15.0-15.5$ mm.

Primenom relacija hidrodinamičke teorije detonacije određeni su parametri:

$$- \text{brzina produkata detonacije, } u_{CJ} = 1.1 \frac{e_{CJ}}{B \cdot l} \text{ (m/s)} \quad (1)$$

(e_{CJ} (V) - vrednost napona u CJ-tački; 1.1 - "popravka" usled slabljenja koaksijalnog kabla).

$$- \text{širina zone hemijske reakcije,} \\ a = \left(D - \frac{u_{CJ} + u_{\max}}{2} \right) \cdot \tau \text{ (mm)} \quad (2)$$

(τ (μs) - vreme hemijske reakcije)

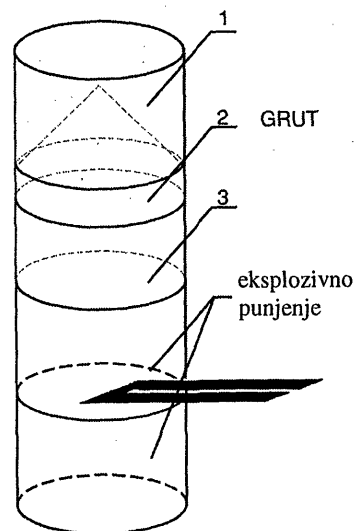
$$- \text{pokazatelj politrope produkata detonacije,} \\ n = \frac{D}{u_{CJ}} - 1 \quad (3)$$

$$- \text{gustina produkata detonacije,} \\ \rho_{CJ} = \rho_0 \frac{D}{D - u_{CJ}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (4)$$

$$- \text{pritisak detonacije, } P_{CJ} = \rho_0 \cdot D \cdot u_{CJ} \text{ (kbar)} \quad (5)$$

Određivanje pritiska detonacije

Pritisak detonacije eksplozivnog punjenja određen je primenom niskoomske manganin sonde, nominalne otpornosti oko 50 m Ω . Na sl.2 predstavljena je skica opitnog uzorka sa ugrađenom manganin sondom [13]. Manganin sonda, čiji je aktivni element izrađen od legure sastava 83% Cu, 13% Mn i 4% Ni, sa piezorezistivnom karakteristikom, izolovana je slojem FEP/PTFE, debljine oko 500 μm . Odbijanje detonacionog talasa o izolacioni sloj je zanemarljivo, jer materijal izolacije u uslovima detonacije ima impedansu blisku impedansi produkata detonacije [14].



Slika 2. Skica uzorka za određivanje pritiska detonacije primenom niskoomske manganin sonde

Prikaz eksperimentalnih rezultata sa diskusijom

Ispitivani su i analizirani eksplozivi različitog sastava, a time i fizičko-hemijskih osobina: oktolti [15], pentoliti, livene eksplozivne smeše TNT-RDX sa dodatkom aluminijuma [16] i elastični "liveni" eksplozivi na bazi poliuretanskog veziva [17-23].

Parametri detonacije oktolita i pentolita

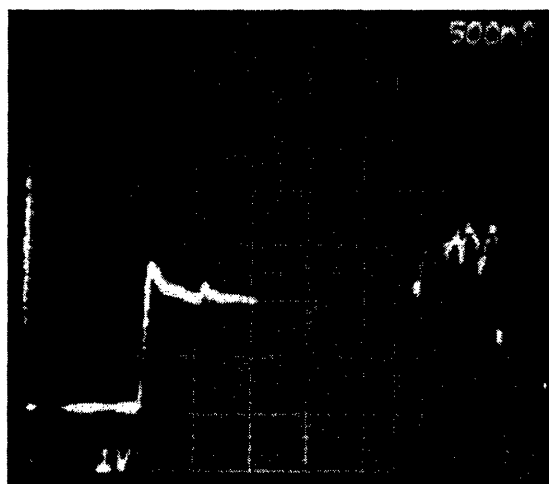
Rezultati dobijeni primenom elektromagnetne metode za oktolite predstavljeni su u tabeli 1, a na slikama 3 i 4 predstavljeni su karakteristični oscilogrami zavisnosti $u(t)$

za oktolit 60/40 i za oktolit sa povećanim sadržajem HMX (80/20).

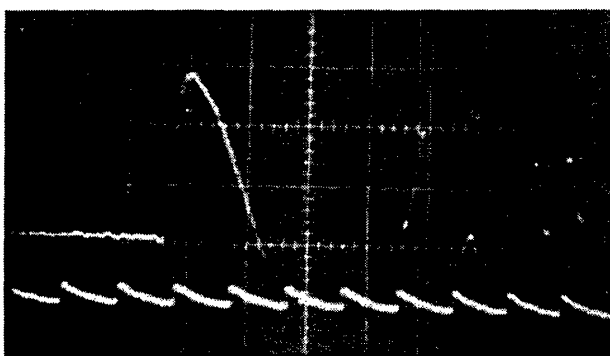
Tabela 1. Prikaz rezultata određivanja parametara detonacije oktolita

sastav (%m/m)		ρ_0 (g/cm ³)	D_{sr} (m/s)	u_{CJsr} (m/s)	τ (μ m)	a (mm)	n	ρ_{CJ} (g/cm ³)	P_{CJ} (kbar)
HMX	TNT								
60*	40	1.79	8130	2125	0.19	1.1	2.9	2.42	309
70	30	1.77	8192	2040	0.27	1.64	3.01	2.35	295
80	20	1.82	8523	2135	0.24	1.48	2.99	2.43	331
89	11	1.84	8778	2181	0.24	1.49	3.02	2.45	352

Napomena: *- rezultati iz [12].



Slika 3. Registrovani odziv elektromagnetne sonde za sastav HMX/TNT 80/20



Slika 4. Registrovani odziv elektromagnetne sonde za sastav HMX/TNT 60/40 [12]

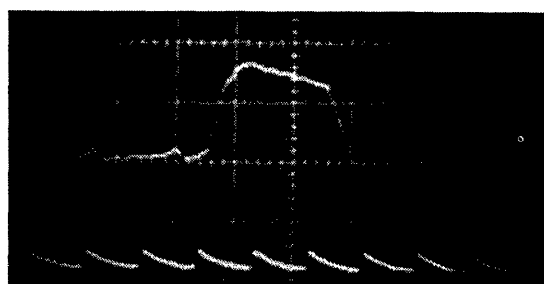
U tabeli 2 predstavljani su rezultati određivanja parametara detonacije pentolita i sastava TNT/PETN 40/60, izrađenog tehnologijom presovanja, dobijenih primenom elektromagnetne metode sa konstantnim magnetnim poljem [12].

Tabela 2. Rezultati ispitivanja livenih punjenja smeša TNT/PETN

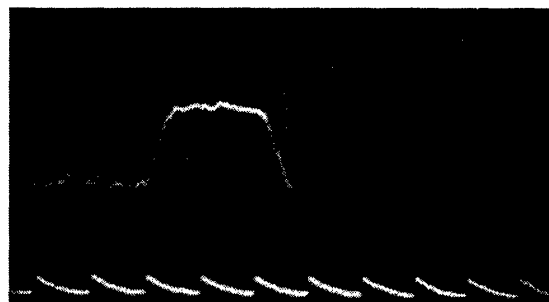
sastav (%m/m)		ρ_0 (g/cm ³)	D_{sr} (m/s)	u_{CJsr} (m/s)	τ (μ s)	a (mm)	n	ρ_{CJ} (g/cm ³)	P_{CJ} (kbar)
PETN	TNT								
60	40	1.67	7525	1838	0.79	4.3	3.0	2.21	231
* 60	40	1.65	7530	1950	0.175	0.9	2.9	2.23	242
20	80	1.59	6980	1624	0.88	4.5	3.0	2.07	180

Napomena: *- sastav dobijen tehnologijom presovanja.

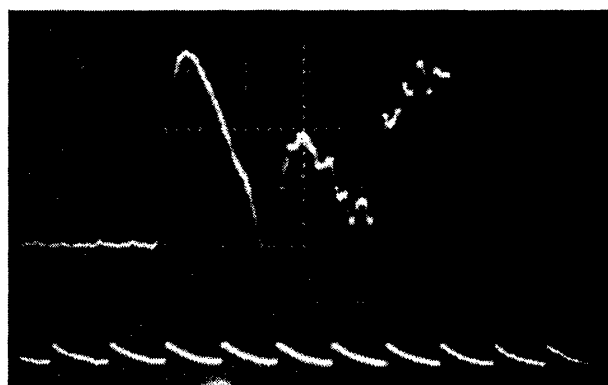
Na slikama 5 i 6 predstavljeni su oscilogrami zavisnosti $u(t)$ za pentolite, a na sl.7 za presovani sastav PETN/TNT 60/40.



Slika 5. Oscilogram $u(t)$ pentolita PETN/TNT 60/40



Slika 6. Oscilogram $u(t)$ pentolita PETN/TNT 20/80



Slika 7. Oscilogram $u(t)$ presovanog sastava PETN/TNT 60/40

Odziv elektromagnetne sonde $u(t)$ za oktolitska eksplozivna punjenja (sl.3) ima trouglasti profil, karakterističan za brzantne eksplozive visokih gustina, i jasno odražava strukturu detonacionog talasa. Maksimum na oscilogramu (jasno izražen pik, sličan Von Neumannovom piku) označava brzinu detonacije neposredno iza čela detonacionog talasa, odnosno u zoni hemijske reakcije. Prevojna tačka iza pika predstavlja kraj reakcione zone - ravan CJ , iza koje sledi Taylerov talas razređenja produkata detonacije. Uočljivo je takođe da, zbog kratkog trajanja, zona hemijske reakcije nije jako izražena - reda je veličine 1.64-1.49 za sadržaj HMX od 70% do 89% m/m respektivno (tabela 1), što ukazuje na činjenicu da ovaj parametar opada sa porastom masenog udela energetski jače komponente u eksplozivnom sastavu.

Profil signala $u(t)$ za detonacioni talas oktolita 60/40 (sl.4), dobijen elektromagnetnom metodom sa permanentnim magnetnim poljem, sličan je profilu na sl.3, s tim što je pik u frontu blago zaobljen (posledica sastava eksplozivnog punjenja). Međutim, vrednosti vremena hemijske reakcije i širine zone hemijske reakcije (tabela 1) su nešto niže od realnih, što se može objasniti većom preciznošću i pouzdanošću mernog sistema metode sa impulsnim magnetnim poljem.

Na osnovu rezultata datih u tabeli 1, sledi da sa porastom % m/m HMX u_{CJ} i P_{CJ} rastu.

Oscilogrami zavisnosti $u(t)$ pentolitskih punjenja su posebno interesantni. Na njima je karakterističan plato, što svedoči o posebnom mehanizmu detonacije i kinetici hemijske reakcije u detonacionom talasu, uslovljene znatnom rastvorljivošću pentrita u TNT (~20% na temperaturi livenja, 80-85°C) i obrazovanja eutektikuma pri hlađenju suspenzije [12]. Potvrda navedene pretpostavke jeste oscilogram dobijen za presovano punjenje približno iste gustine, kod kojeg nije evidentiran plato - profil $u(t)$ je karakterističnog trouglastog oblika. U skladu sa tim, određene vrednosti širine zone za isti sastav se jako razlikuju - za liveno punjenje je 4.5 mm ($\tau=0.88 \mu\text{s}$), a za presovano 0.9 mm ($\tau=0.175 \mu\text{s}$).

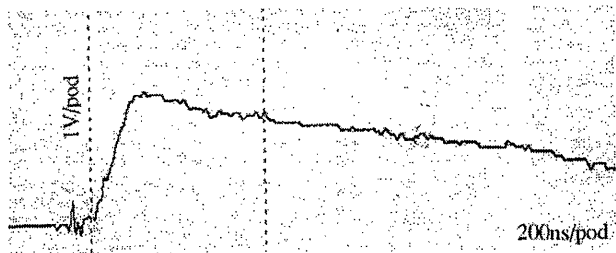
Brzina i pritisak detonacije, kao i brzina produkata detonacije, rastu sa porastom sadržaja pentrita. Dobijene vrednosti za pokazatelje politrope, kao i kod oktolita, teže broju 3 (tipično za kondenzovane brizantne eksplozive).

Parametri detonacije livenih eksplozivnih smeša RDX/TNT/Al različitog sastava

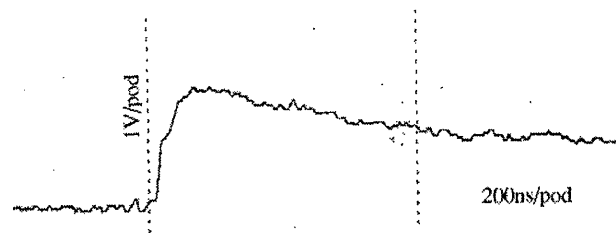
Parametri detonacije livenih trokomponentnih smeša RDX/TNT/Al, sa različitim sadržajem aluminijuma, određeni primenom elektromagnetne metode, predstavljeni su u tabeli 3, a dobijeni zapisi $u(t)$ predstavljeni su na slikama 8-10.

Tabela 3. Rezultati određivanja parametara detonacije primenom elektromagnetne sonde u livenim eksplozivima RDX/TNT sa dodatkom Al.

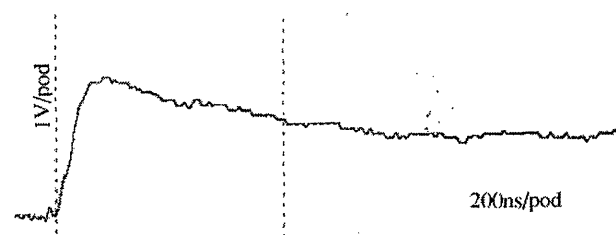
sastav (%m/m)			ρ_0 (g/cm ³)	D_{sr} (m/s)	u_{CJ} (m/s)	τ (μs)	a (mm)	n	ρ_{CJ} (g/cm ³)	P_{CJ} (kbar)
RDX	TNT	Al								
40 (HBX-1)	40	20	1.82	7560	1327.7	0.554	3.36	4.72	2.21	182.7
35 (HBX-3)	30	35	1.93	7320	1156.2	0.882	5.21	5.41	2.29	163.4
45 (H-6)	30	25	1.87	7440	1444.1	0.724	4.18	4.15	2.32	201.0



Slika 8. Dijagram $u(t)$ za sastav HBX-1

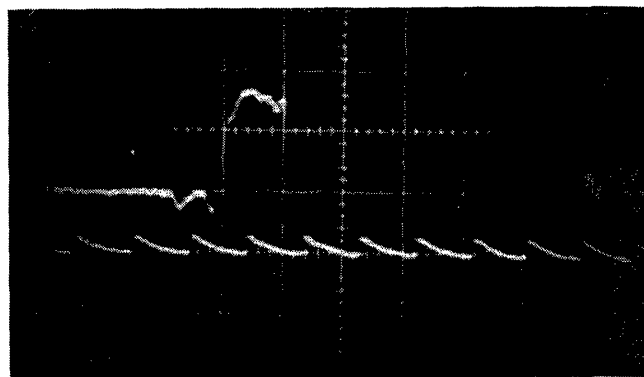


Slika 9. Dijagram $u(t)$ za sastav HBX-3



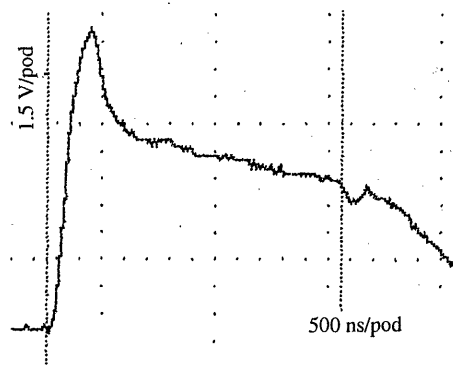
Slika 10. Dijagram $u(t)$ za sastav H-6

Radi poređenja, na sl.11 je predstavljen oscilogram za sastav HBX-1 [12], dobijen metodom sa konstantnim magnetnim poljem.



Slika 11. Dijagram $u(t)$ za sastav HBX-1

Na sl.12 predstavljen je oscilogram $u(t)$ dobijen za sastav Al-PBX-3 [8], da bi se sagledao uticaj Al na različite tipove eksploziva.



Slika 12. Dijagram $u(t)$ za sastav Al-PBX-3 [8]

Iako gustina trokomponentnih livenih smeša RDX/TNT/Al znatno raste sa povećanjem sadržaja Al, brzina detonacije i brzina produkata detonacije opadaju (tabela 3). Profil $u(t)$ za sva tri ispitivana sastava je trapezastog oblika, sa jasno izraženim platoom (sl.8-10), što ukazuje na produženje vremena i širine zone hemijske reakcije u detonacionom talasu i dovodi u sumnju hipotezu nekih autora da se Al u zoni hemijske reakcije ponaša kao inertan materijal [24].

Za profil $u(t)$ aluminiziranih livenih eksploziva karakteristična je "grba" iza CJ tačke i sporije opadanje masene brzine sa vremenom u talasu razređenja, što predstavlja eksperimentalnu potvrdu naknadnog reagovanja Al sa produktima detonacije u zoni razređenja.

Interesantno je da je isti profil $u(t)$ dobijen i za aluminizirane sastave na bazi RDX i poliuretanskog veziva (PU), što je ilustrovano na sl.12 [8].

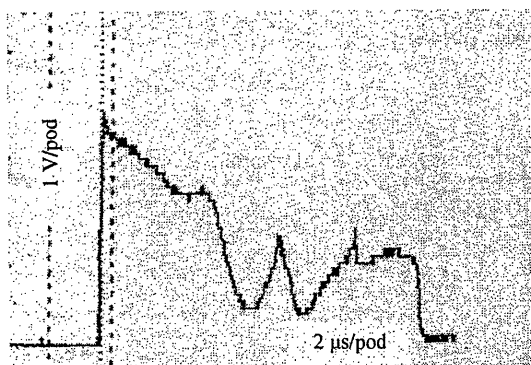
Veličina vremena i širine zone hemijske reakcije blago rastu sa povećanjem sadržaja Al (tabela 3).

Parametri detonacije elastičnih eksploziva na bazi HMX (RDX) i PU veziva

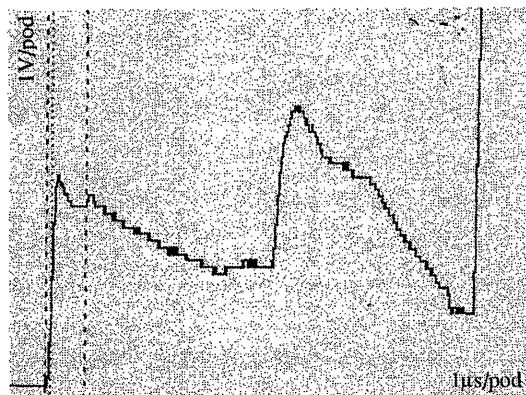
Primenom elektromagnetne metode dobijeni su rezultati predstavljeni u tabeli 4, a na slikama 13-18 predstavljeni su registrovani oscilogrami $u(t)$ ispitanih sastava.

Tabela 4. Rezultati ispitivanja PBX različitog sastava primenom elektromagnetne metode

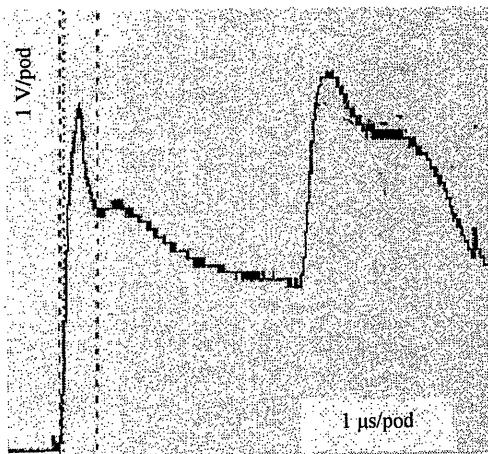
sastav (%m/m)					ρ_0 (g/cm ³)	D_{sr} (m/s)	u_{CJsr} (m/s)	τ (μ s)	a (mm)	n	ρ_{CJ} (g/cm ³)	P_{CJ} (kbar)
HMX	RDX	PU	Ba(NO ₃) ₂	PETN								
82	-	18	-	-	1.63	8229	1776.9	0.31	1.985	3.63	2.075	238.3
80	-	20	-	-	1.607	8250	1953.3	0.36	2.17	3.19	2.10	258.9
-	83	17	-	-	1.588	8020	1722.7	0.26	1.30	3.65	2.02	219.4
-	80	20	-	-	1.568	7900	1746.6	0.453	2.74	3.51	2.01	216.4
-	40	20	40	-	1.832	6180	1470.0	0.48	2.196	3.20	2.40	166.4
-	-	20	60	20	2.052	4348	973.0	0.65	2.09	3.46	2.64	86.81



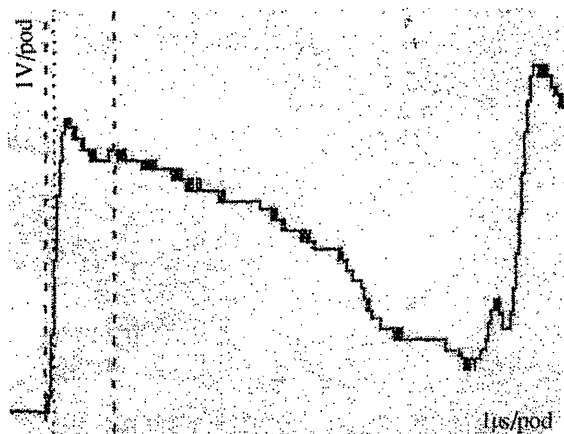
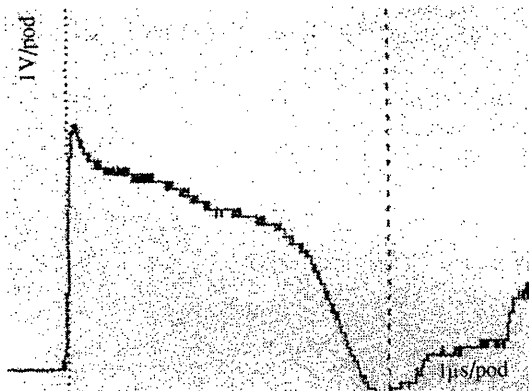
Slika 13. Odziv elektromagnetne sonde u eksplozivnom punjenju HMX/PU 82/18



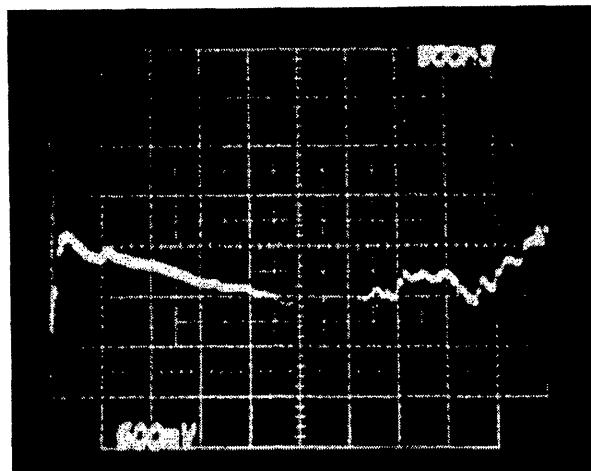
Slika 16. Odziv elektromagnetne sonde u eksplozivnom punjenju RDX/PU 80/20



Slika 14. Odziv elektromagnetne sonde u eksplozivnom punjenju HMX/PU 80/20

Slika 17. Odziv elektromagnetne sonde u eksplozivnom punjenju RDX/Ba(NO₃)₂/PU 40/40/20

Slika 15. Odziv elektromagnetne sonde u eksplozivnom punjenju RDX/PU 83/17

Slika 18. Odziv elektromagnetne sonde u eksplozivnom punjenju PETN/Ba(NO₃)₂/PU 20/60/20

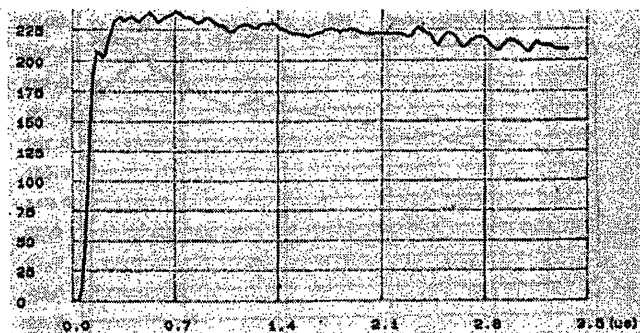
Da bi se utvrdila mogućnost pouzdanog i preciznog određivanja jednog parametra primenom različitih eksperimentalnih metoda, pristupilo se direktnom merenju P_{CJ} i τ manganin metodom. Rezultati su predstavljeni u tabeli 5.

Tabela 5. Rezultati određivanja pritiska detonacije livenih kompozitnih eksploziva

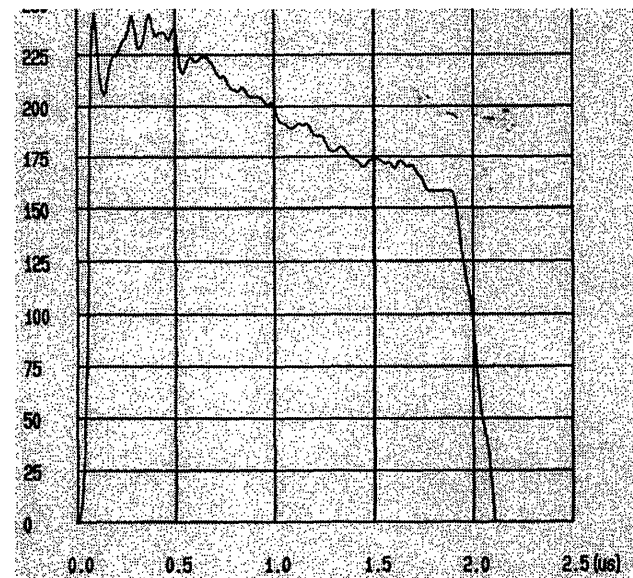
sastav (%m/m)					ρ_0 (g/cm ³)	D_{sr} (m/s)	broj opita	P_{CJ} (kbar)	u^*_{CJsr} (m/s)	P^*_{CJ} (kbar)
HMX	RDX	PU	Ba(NO ₃) ₂	PETN						
82	-	18	-	-	1.59	8160	3	232	-	-
80	-	20	-	-	1.607	8250	5	242	1960	260
							11	256		
-	85	15	-	-	1.575	8020	1	203	-	-
-	84	16	-	-	1.595	8120	1	220	-	-
-	83	17	-	-	1.588	8000	2	200	-	-
-	83	17	-	-	1.59	8020	8	210	-	-
-	80	20	-	-	1.559	7860	3	188	-	-
-	80	20	-	-	1.568	7900	6	220	1780	220
-	40	20	40	-	1.832	6180	7	170	1470	166
-	-	20	60	20	2.0	4350	5	108.5	973	86.81

(* - rezultati dobijeni elektromagnetnom metodom)

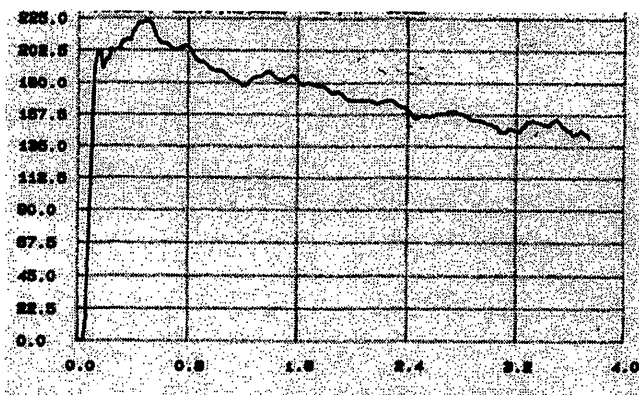
Na slikama 19-26 predstavljena je promena pritiska sa vremenom za registrovane oscilogramе $P(t)$.



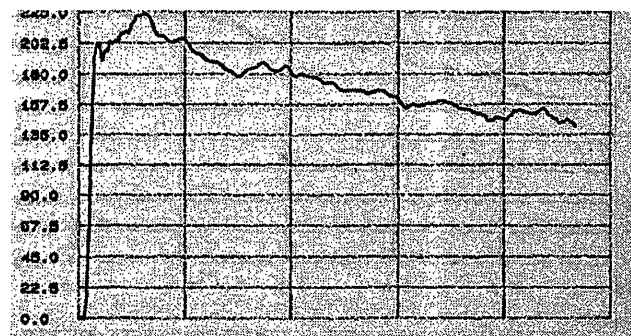
Slika 19. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu HMX/PU 82/18



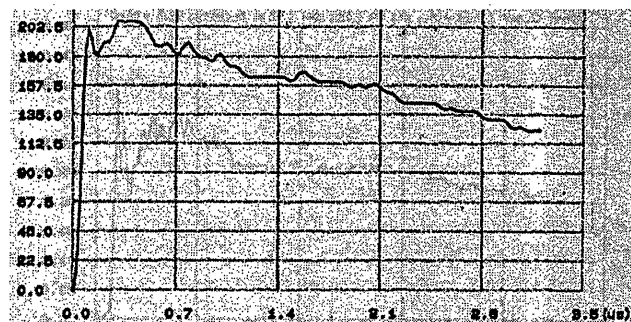
Slika 20. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu HMX/PU 80/20



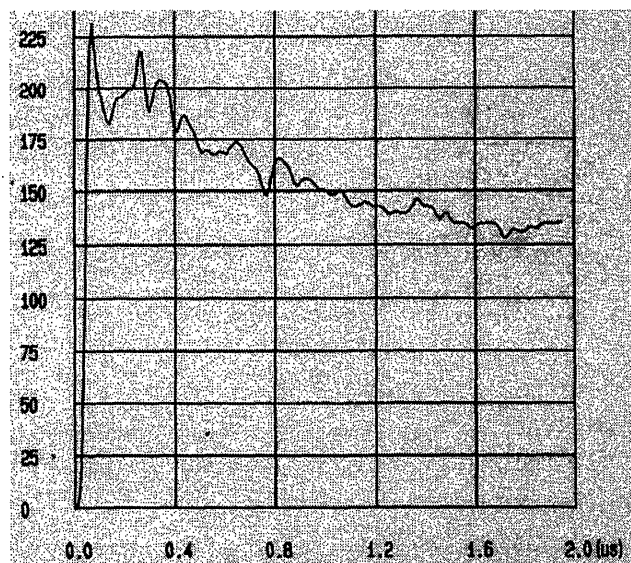
Slika 21. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu RDX/PU 85/15



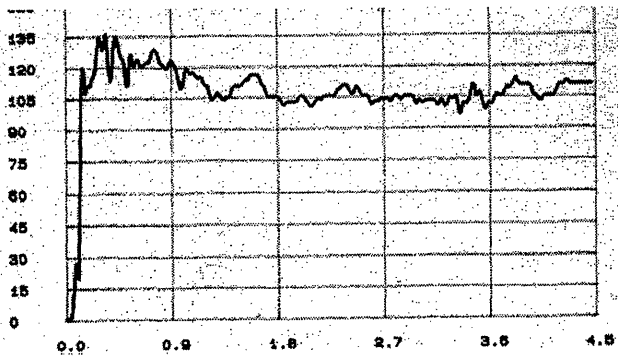
Slika 22. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu RDX/PU 84/16



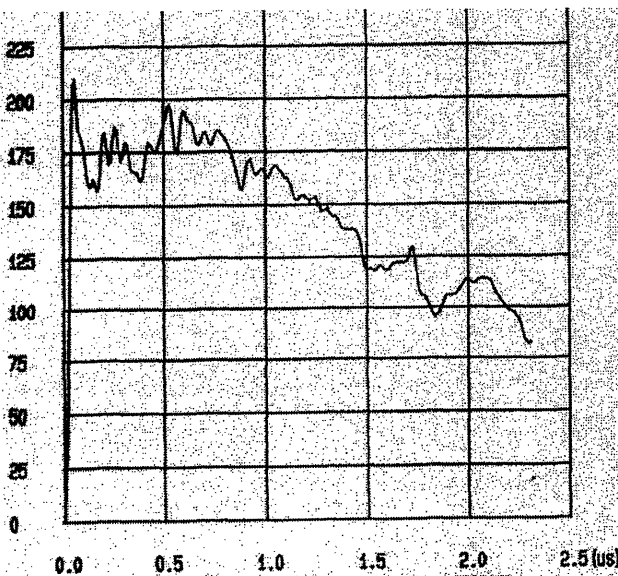
Slika 23. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu RDX/PU 83/17



Slika 24. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu RDX/PU 80/20



Slika 25. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu PETN/Ba(NO₃)₂/PU 20/60/20



Slika 26. Profil $P(t)$ u kompozitnom eksplozivu RDX/Ba(NO₃)₂/PU 40/40/20

Profil odziva elektromagnetne sonde u livenim elastičnim eksplozivima (sl.13-16) verno odslikava promenu brzine produkata. Kod ovih sastava registrovan je veoma specifičan oscilogram - najpre se javlja oštar pik u frontu talasa, zatim brzina produkata detonacije naglo opada da bi usledilo nešto umerenije smanjenje $u(t)$. Karakteristično je da se na kraju zone hemijske reakcije, na završetku ravni CJ , registruje ponovni porast $u(t)$, odnosno sekundarni pik, a iza njega talas razređenja. Ovakva raspodela parametra $u(t)$ ukazuje na složeniji mehanizam detonacije, koji odstupa od klasičnog ZND modela, tj. na dvostepeni mehanizam. Naime, u zoni hemijske reakcije postoje dve fizički odvojene faze: produkti detonacije eksploziva i veziva (tanak sloj veziva, koji okružuje čestice eksploziva, generiše produkte razlaganja koji su u ravnoteži sa produktima detonacije čestica eksploziva) i komplementaran deo veziva, koji ne reaguje dovoljno brzo da stupi u interferenciju sa produktima detonacije, već reaguje naknadno (sekundarni pik na kraju zone reakcije). Primetno je i znatno povećanje vremena hemijske reakcije, u odnosu na punjenja na bazi TNT, što se takođe može objasniti dvostepenošću reakcije.

Opadanje parametra $u(t)$ u Tejlorovom talasu razređenja je sporije no kod livenih eksploziva na bazi TNT, što, takođe, ukazuje na dvostepeni mehanizam odvijanja hemijskog razlaganja.

Polazeći od osnovnih postavki hidrodinamičke teorije detonacije, sa porastom masenog udela energetski jače komponente u eksplozivnim sastavima rastu i parametri

detonacionog talasa. Međutim, analizom rezultata merenja u_{CJ} , D i P_{CJ} (tabela 5) za RDX-elastične eksplozive, utvrđeno je da se veličine ovih parametara uvećavaju sa porastom udela energetske komponente, dok je kod HMX-elastičnih sastava konstatovana obrnuta zavisnost. Ove, suprotno očekivanim, rezultate potrebno je u narednim istraživanjima potvrditi, ili pak demantovati.

Rezultati određivanja pritiska detonacije ukazuju da sastavi sa PU vezivom imaju mnogo niže vrednosti P_{CJ} u odnosu na sastave sa TNT (tabela 5). Takođe, ispoljen je veliki uticaj sastava i gustine na vrednost parametara detonacije. Evidentno je da se vrednosti za D , P_{CJ} i u_{CJ} bitno smanjuju unošenjem većeg sadržaja inertne komponente u eksplozivni sastav.

Kod PBX sastava sa 40% inertnog dodatka Ba(NO₃)₂ znatno je smanjena brzina detonacije (i pored povećane gustine) u odnosu na RDX/PU sastave sa istim % (m/m) veziva, što se objašnjava smanjenom količinom eksplozivne komponente.

PBX sastavi PETN/ Ba(NO₃)₂ /PU 20/60/20 imaju najnižu brzinu detonacije, kao i brzinu produkata detonacije.

Upoređivanjem rezultata direktnog merenja P_{CJ} manganin metodom i rezultata indirektnog proračuna ovog parametra na osnovu relacije (5), može se uočiti dobra saglasnost vrednosti, što je bitno s aspekta praktične primene ovih metoda.

Potrebno je naglasiti da, prilikom određivanja parametara detonacije manganin metodom, nisu određivane vrednosti za širinu zone hemijske reakcije. Naime, brzina dejstva sonde, odnosno vreme uspostavljanja signala sonde, je ispod 50 ns. Takva vremenska rezolucija niskoomske sonde obezbeđuje određivanje vrednosti P_{CJ} , ali se širina zone u detonacionom talasu ne može utvrditi. Veća vremenska rezolucija potiče od debljine zaštitnih slojeva sonde (oko 500μm).

Zaključak

Prezentirani rezultati merenja parametara detonacije livenih eksploziva i njihova analiza ukazuju:

- na složenost i raznovrsnost promene masene brzine u detonacionom talasu, odnosno profila $u(t)$ i $P(t)$ i da dominantan uticaj na ove zavisnosti ispoljava struktura i sastav brzantnog eksploziva;
- registrovani profili $u(t)$ omogućuju donošenje relativne procene mehanizma i kinetike hemijskog razlaganja eksploziva zavisno od gustine, strukture i fizičko-hemijskih karakteristika eksplozivnog punjenja;
- da odziv signala $u(t)$ za detonacioni talas oktolita ima karakterističan trouglast profil, a za pentolite i RDX/TNT sastave sa Al ima tipičan trapezast oblik sa jasno izraženim platoom; u skladu sa tim, širina zone i vreme hemijske reakcije su kod ovih sastava znatno veći nego kod oktolita;
- da se profil zavisnosti $u(t)$ livenog pentolita 60/40 vidno razlikuje od profila $u(t)$ presovanog sastava PETN/TNT 60/40 (dobijen je trouglasti profil, karakterističan za eksplozive visoke gustine), što je posledica različite strukture punjenja;
- da produženje vremena i uvećanje širine zone hemijske reakcije kod RDX/TNT sastava sa Al (vrednosti ovih parametara su 3-4 puta veće nego kod oktolita) potvrđuje hipotezu da se Al u detonacionom talasu ne ponaša kao inertan materijal;
- da mehanizam razlaganja elastičnih eksploziva na bazi HMX(RDX) i poliuretanskog elastomera odstupa od kla-

sičnog ZND modela: profil dobijenih zapisa $u(t)$ je specifičan (registrovan je sekundarni pik) i navodi na zaključak da je u pitanju dvostepeni mehanizam odvijanja hemijskih reakcija;

- da je veličina parametara detonacije brizantnih eksploziva direktna funkcija njegovog sastava; sa porastom sadržaja energetski jače komponente (HMX, RDX,...) u sastavu vrednosti ovih parametara rastu i obrnuto, sa unošenjem veće količine inertne komponente (Al, poliuretanski elastomer, barijum-nitrat) te vrednosti opadaju;
- ostvarena je zadovoljavajuća saglasnost rezultata direktnog merenja pritiska detonacije elastičnih eksploziva manganin metodom i proračunate vrednosti ovog parametra na osnovu rezultata merenja masene brzine elektromagnetnom metodom, što je veoma bitno s aspekta praktične primene ove dve metode;
- dobijeni zapisi $u(t)$ i $P(t)$ svih ispitivanih sastava jasno odražavaju strukturu detonacionog talasa: oštar pik u frontu, stacionarna zona hemijske reakcije sa ravni CJ na kraju i talas razređenja.

Literatura

- [1] DREMIN, A.N. i dr. *Detonacionne volni v kondensirovannih sredah*. Moskva, Nauka, 1970.
- [2] DREMIN, A.N. i dr. *Struktura detonacionnog fronta v kondensirovannih vzrivčatnih vešestvah*. FGV, 1969., no.3, p.291-303.
- [3] VERETENNIKOV, V.A. *Himičeskaja fizika processov gorenija i vzriva*. Detonacija. Černogolovka, 1980., p.3-7.
- [4] ALJTSULER, L.V. i dr. *Režimi detonacii i parametri žuge kondensirovannih vzrivčatnih vešestv*. FGV, 1982., no.2, p.84-103.
- [5] AŠAEV, V.K. i dr. *O strukture detonacionnog fronta v kondensirovannih VV*. FGV, 1988., no.1, p.95-99.
- [6] ŠVEDOV, K.K. *Nekotorie voprosi detonacii smesevih VV*. Detonacija. Černogolovka 1981., p.28-35.
- [7] SNO 1475: *Metoda merenja brzine detonacije elektronskim brojačem*.
- [8] DŽINGALAŠEVIĆ, V., ANTIĆ, G. *Eksplozivne karakteristike elastičnih eksploziva na bazi RDX, Al i poliuretanskog veziva*. *Naučno-tehnički pregled*, 1997., vol.XLVII, no.5-6, p.14-18.
- [9] DŽINGALAŠEVIĆ, V. *Uputstvo za merenje masene brzine udarnog talasa i brzine produkata detonacije primenom elektromagnetne metode sa impulsnim magnetnim poljem*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1994.
- [10] JACOBS, S.J., EDWARDS, D.J. *Experimental study of the electromagnetic velocity gage technique*. V symp. on det., 1972., p.323-334.
- [11] ANASTASIJEVIĆ, S. *Dobijanje ravnog udarnog talasa različitog intenziteta*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1984.
- [12] ANASTASIJEVIĆ, S. *Ispitivanje parametara detonacije elektromagnetnom metodom*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1975.
- [13] DŽINGALAŠEVIĆ, V. *Metoda određivanja pritiska detonacionog talasa primenom niskoomske manganin sonde*. tehničko uputstvo., int. dok., VTI VJ Beograd, 1997.
- [14] VANTINE, H. et al. *Precision stress measurements in severe shock-wave environments with low-impedance manganin gauges*. *Rev. Sci. Instrum.* 1980., vol.51, no.1, p.110-122.
- [15] AZDEJKOVIĆ, M. *Ispitivanje mogućnosti dobijanja oktolitskih eksplozivnih punjenja maksimalnih energetskih performansi za potrebe laboracije kumulativnih projektila*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1988.
- [16] ANTIĆ, G. *Eksplozivne karakteristike livenih eksplozivnih smeša na bazi TNT, RDX i Al*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1996.
- [17] BLAGOJEVIĆ, M., ANTIĆ, G. *Tehnološki postupak izrade i osnovne karakteristike livenih kompozitnih eksploziva na bazi PU veziva*. *Naučnotehnički pregled*, 1989., vol.XXXIX, no.7, p.35-39.
- [18] ANTIĆ, G., BLAGOJEVIĆ, M. *Liveni kopmozitni eksplozivi na bazi poliuretanskog veziva niske brzine detonacije*. *Naučno-tehnički pregled*, 1991., vol.XLI, no.6, p.24-28.
- [19] BLAGOJEVIĆ, M., ANASTASIJEVIĆ, S., DŽINGALAŠEVIĆ, V. *Parametri detonacije kompozitnog livenog eksploziva odabranog sastava na bazi poliuretana i oktogena*. XVIII simpozijum o EM, JKEM, Kupari (1990.), p.21-26.
- [20] BLAGOJEVIĆ, M. *Istraživanje mogućnosti dobijanja kompozitnih livenih eksploziva sa maksimalnim sadržajem oktogena*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1990.
- [21] ANTIĆ, G. *Ispitivanje mogućnosti dobijanja livenih kompozitnih eksploziva na bazi RDX maksimalnih parametara detonacije*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1989.
- [22] ANTIĆ, G. *Liveni kompozitni eksplozivi na RDX i poliuretanskog veziva maksimalnih parametara detonacije*. int. dok., VTI VJ Beograd, 1990.
- [23] ANTIĆ, G., STANKOVIĆ, M. *Karakteristike elastičnih eksploziva na bazi RDX, aluminijuma i poliuretanskog veziva*. *Naučnotehnički pregled*, 1997., vol.XLVII, no.5-6, p.7-13.
- [24] ANISKIN, A.I. *Detonacija smesei vzrivčatnih vešestv s alominiem processah, soprovoždanoših detonacionno - gasovoe naplavlenie*. *Detonacija*. Černogolovka, 1986., p.26-32.

Rad primljen: 11.11.1999.god.